



TUGAS AKHIR - TF 141581

**PERANCANGAN *OPTIMAL TRACKING CONTROL*
KAPAL LNG DENGAN BEBAN MUATAN PENUH
KELUAR DARI PELABUHAN ARUN**

**FARIDA AMBARWATI
NRP. 2413 100 064**

**Dosen Pembimbing :
Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.**

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 141581

***DESIGN OPTIMAL TRACKING CONTROL
ON THE LNG SHIP WITH FULL LOAD CHARGE
EXIT FROM ARUN'S PORT***

***FARIDA AMBARWATI
NRP. 2413 100 064***

***Supervisors :
Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.***

***ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017***

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Farida Ambarwati
NRP : 2413100064
Departemen/ Prodi : Teknik Fisika/ S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Perancangan *Optimal Tracking Control* Kapal LNG Dengan Beban Muatan Penuh Keluar Dari Pelabuhan Arun” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 11 Januari 2017
Yang membuat pernyataan,



Farida Ambarwati
NRP. 2413100064

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

PERANCANGAN *OPTIMAL TRACKING CONTROL* KAPAL LNG DENGAN BEBAN MUATAN PENUH KELUAR DARI PELABUHAN ARUN

Oleh:

Farida Ambarwati
NRP 2413 100 064

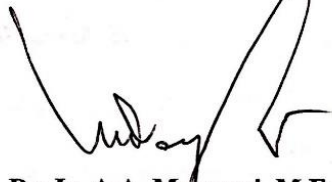
Surabaya, 11 Januari 2017

Menyetujui,
Dosen Pembimbing I



Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
NIPN. 19660116 198903 2 001

Menyetujui,
Dosen Pembimbing II



Dr. Ir. A.A. Masroeri, M.Eng.
NIPN. 19580807 198403 1 001



Mengetahui,
Ketua Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS

Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si, Ph.D

NIPN. 19780902 200312 1 002

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN II
PERANCANGAN *OPTIMAL TRACKING CONTROL*
KAPAL LNG DENGAN BEBAN MUATAN PENUH
KELUAR DARI PELABUHAN ARUN

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

FARIDA AMBARWATI
NRP. 2413 100 064

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T. (Pembimbing I)
2. Dr. Ir. A.A. Masroeri, M.Eng. (Pembimbing II)
3. Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA. (Penguji I)
4. Dr. Ir. Ali Musyafa', M.Sc. (Penguji II)
5. Bagus Tris Atmaja, S.T., M.T. (Penguji III)

SURABAYA
JANUARI, 2017

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

PERANCANGAN *OPTIMAL TRACKING CONTROL* KAPAL LNG DENGAN BEBAN MUATAN PENUH KELUAR DARI PELABUHAN ARUN

Nama : Farida Ambarwati
NRP : 2413 100 064
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : 1.Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
2.Dr. Ir. A.A. Masroeri, M.Eng.

Abstrak

Batasan area Pelabuhan Arun yang sempit memerlukan adanya sistem kendali guna memperkecil *error* lintasan kapal. Sistem kendali *Linear Quadratic Gaussian* digunakan dalam persamaan plant kapal dalam bentuk ruang keadaan (*state-space*). Penelitian dilakukan dengan cara simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB R2009a. Pengujian sistem dilakukan dengan 4 tahap yakni uji kestabilan, uji keterkendalian, uji keteramatan, uji *close loop*, uji lintasan kapal. Hasil pengujian tanpa ada gangguan angin didapatkan nilai kesalahan maksimal X dan Y pada lintasan kapal kosong dan kapal beban penuh yaitu sumbu X 0.1962 km, 0.1931 km dan sumbu Y adalah 0.1139 km, 0.1121 km. Pengujian lintasan kapal dengan adanya gangguan angin dengan variasi sudut 30°, 40°, 50° menghasilkan nilai *error* yang sama pada setiap kondisi kapal. Nilai *error* maksimal X dan Y pada lintasan kapal kosong dan kapal beban penuh memiliki nilai yang sama yaitu 0.001028 km. Seluruh data lintasan aktual yang telah didapatkan menunjukkan bahwa sistem kendali optimal menggunakan metode *Linear Quadratic Gaussian* lebih efektif untuk diterapkan pada sistem yang memiliki gangguan dari lingkungan.

Kata Kunci : Beban penuh, *Error* lintasan minimal, Gangguan Angin, Kapal LNG , Sistem kendali LQG .

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN OPTIMAL TRACKING CONTROL ON THE LNG SHIP WITH FULL LOAD CHARGE EXIT FROM ARUN'S PORT

Name : Farida Ambarwati
NRP : 2413 100 064
Department : Engineering Physics FTI-ITS
Supervysors : 1.Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
2. Dr. Ir. A.A. Masroeri, M.Eng

Abstract

Limitation of Arun's port area requires the control system to minimize error value of ship trajectory. Linear Quadratic Gaussian control system used in state-space model of ship dynamic system. The study was conducted by simulation using MATLAB R2009a software. System testing is done with 4 stages there were stability test, controllability test, observability test, close loop test, track test vessel. The test results without any wind disturbance obtain maximum error value X and Y on the track of empty ship and a full load one ,i.e the X axis 0.1962 km; 0.1931 km and, the Y axis is 0.1139 km, 0.1121 km .Tracking test of the ship with wind disturbances using variations in angle of 30°, 40°, 50° yield has the same error value in every condition of the ship. The maximum error value X and Y on the track empty and full load conditon is 0.001028 km. Optimal control system uses Linear Quadratic Gaussian method is more effective to apply in systems that have interference from the environment disturbances.

Keywords : full load, the minimum track error, wind distrubance, LNG ships, LQG control system.

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya Tugas Akhir beserta Laporan Tugas Akhir yang berjudul **PERANCANGAN *OPTIMAL TRACKING CONTROL* KAPAL LNG DENGAN BEBAN MUATAN PENUH KELUAR DARI PELABUHAN ARUN.**

Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian Tugas Akhir dan laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, ST, MSi, Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Fisika dan dosen wali yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika.
2. Kedua orang tua serta saudara terimakasih atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
3. Ibu Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T. dan Bapak Dr. Ir. A.A. Masroeri, M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
4. Bapak Totok Ruki Biyanto S.T., M.T., Ph.D. selaku Kepala Laboratorium Rekayasa Instrumensi yang telah memberikan ilmu, petunjuk, nasihat, serta kemudahan perizinan.
5. Bapak Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA selaku dosen wali penulis yang telah membimbing selama perkuliahan.
6. Seluruh teman Tugas Akhir (Ajeng, Mima, dkk), terima kasih untuk semuanya.
7. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademik Teknik Fisika FTI-ITS, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
8. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas bantuannya.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini tidaklah sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika khususnya, dan civitas akademik ITS pada umumnya. Selain itu juga semoga dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan Tugas Akhir bagi mahasiswa yang lain.

Surabaya, 11 Januari 2017

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
<i>TITLE PAGE</i>	iii
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
LEMBAR PENGESAHAN II	vii
Abstrak	ix
<i>Abstract</i>	xi
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR NOTASI	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Sistematika Laporan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Model Dinamika Kapal	5
2.2 Model Kinematik Kapal	11
2.3 Strategi Optimal <i>Linear Quadratic Gaussian</i> (LQG).	12
2.4 Pemodelan Gangguan Angin.....	17
2.5 Standar <i>Manuevering</i> Kapal.....	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Studi Literatur	22
3.2 Pengumpulan Data	22
3.3 Pemodelan Dinamika Kapal LNG	26
3.4 Matriks Transformasi Kinematika	30
3.5 Pemodelan Beban Angin.....	31
3.6 Perancangan Sistem <i>Optimal Tracking Control</i> Kapal Menggunakan Kendali Optimal LQG	36
3.7 Pengujian Sistem <i>Optimal Tracking Control</i>	42
3.8 Penutup.....	42
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	43
4.1 Uji Kestabilan Sistem.....	43

4.2	Uji Keterkendalian (<i>Controllability</i>).....	44
4.3	Uji Keteramatan (<i>Observabilit</i>).....	45
4.4	Perancangan Kendali LQG.....	46
4.5	Uji <i>Close-Loop</i> respon sistem	49
4.6	Hasil Simulasi <i>Optimal Tracking Control</i> Pada Kapal LNG.....	51
BAB V PENUTUP		69
5.1	Kesimpulan	69
5.2	Saran.....	69
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN A PERHITUNGAN SISTEM DINAMIKA KAPAL		
LAMPIRAN B NILAI Q dan R TERHADAP PERFORMANSI (LQG)		
LAMPIRAN C PERHITUNGAN GANGGUAN ANGIN		
LAMPIRAN D HASIL SIMULASI		
BIODATA PENULIS		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Gerakan Kapal (Fossen, 1994).....	6
Gambar 2. 2	Acuan Dimensi Kapal (Fossen, 1994)	11
Gambar 2. 3	Diagram Blok Sistem LQG (Lewis, Vrabie, & Syrmos, 2012)	15
Gambar 2. 4	Kecepatan dan Arah Angin Pada Kapal (Fossen, 1994)	18
Gambar 3. 1	Diagram Alir Penelitian	21
Gambar 3. 2	Jalur Keluaran Kapal dari Pelabuhan Arun.....	25
Gambar 3. 3	Data Kecepatan Angin Banda Aceh Tahun 2016	33
Gambar3. 4	Ilustrasi Gaya Angin terhadap Sudut <i>Heading</i> Kapal	34
Gambar 3. 5	Diagram Blok Sistem Manuevering kapal LNG... ..	36
Gambar 3. 6	Blok Diagram sistem LQG (Lewis, Vrabie, & Syrmos, 2012)	37
Gambar 3. 7	Diagram Alir Pembuatan LQG	38
Gambar 3. 8	<i>Simulink</i> trayektori Kapal LNG tanpa gangguan angin dengan Kendali LQG.....	40
Gambar 3. 9	<i>Simulink</i> trayektori Kapal LNG dengan gangguan angin dengan Kendali LQG.....	41
Gambar 4. 1	Respon <i>Close Loop</i> dengan <i>Input Step Setpoint</i> 20°	50
Gambar 4. 2	Respon <i>Close Loop</i> dengan <i>Input Step Setpoint</i> 30°	51
Gambar 4. 3	Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Tanpa Beban	52
Gambar 4. 4	Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Beban Penuh	53
Gambar 4. 5	Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Tanpa Beban Dengan Gangguan Angin 1.5 km/jam dengan sudut 30 derajat.....	55
Gambar 4. 6	Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Tanpa Beban Dengan Gangguan Angin 1.5 km/jam dengan sudut 40 derajat.....	56

Gambar 4. 7	Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Tanpa Beban Dengan Gangguan Angin 1.5 km/jam dengan sudut 50 derajat	57
Gambar 4. 8	Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Tanpa Beban Dengan Gangguan Angin 15 km/jam dengan sudut 30 derajat	58
Gambar 4. 9	Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Tanpa Beban Dengan Gangguan Angin 15 km/jam Dengan Sudut 40 Derajat	59
Gambar 4. 10	Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Tanpa Beban Dengan Gangguan Angin 15 km/jam dengan sudut 50 derajat	60
Gambar 4. 11	Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Beban Penuh Dengan Gangguan Angin 1.5 km/jam dengan sudut 30 derajat	61
Gambar 4. 12	Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Beban Penuh Dengan Gangguan Angin 1.5 km/jam dengan sudut 40 derajat	62
Gambar 4. 13	Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Beban Penuh Dengan Gangguan Angin 1.5 km/jam dengan sudut 50 derajat	63
Gambar 4. 14	Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Beban Penuh Dengan Gangguan Angin 15 km/jam dengan sudut 30 derajat	64
Gambar 4. 15	Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Beban Penuh Dengan Gangguan Angin 15 km/jam dengan sudut 40 derajat	65
Gambar 4. 16	Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Beban Penuh Dengan Gangguan Angin 15 km/jam dengan sudut 50 derajat	66

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Derajat Kebebasan Gerak Kapal (Fossen, 1994)	5
Tabel 2. 2 Normalisasi Model Dinamika Kapal (Fossen, 1994)	10
Tabel 2. 3 Standar Manuverabilitas dari IMO (Resolution MSC, Vol.137, 2002).....	20
Tabel 3. 1 Data Spesifikasi Kapal LNG Tangguh Towuti.....	22
Tabel 3. 2 Konversi Lintasan Kapal Dalam Kilometer	23
Tabel 3. 3 Koefisien Hidrodinamika Kapal LNG Kosong	26
Tabel 3. 4 Koefisien Hidrodinamika Kapal LNG Beban Penuh.....	28
Tabel 3. 5 Data Kecepatan Angin di Banda Aceh tahun 2016 (Anonim)	32
Tabel 3. 6 Koefisien Gangguan Angin (Fossen, 1994).....	34
Tabel 3. 7 Nilai Gaya dan Momen Angin Pada Tiga Variasi Sudut.....	35
Tabel 4. 1 Nilai <i>error</i> lintasan maksimal kapal LNG	67

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR NOTASI

η	=	vektor orientasi arah
$J(\eta)$	=	matriks transformasi
M	=	matriks inersia
D	=	matriks redaman
\dot{v}	=	vektor percepatan <i>sway</i>
\dot{r}	=	Vektor percepatan <i>yaw</i>
$Y'_{\dot{v}}$	=	turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap \dot{v} nondimensional
$Y'_{\dot{r}}$	=	turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap \dot{r} nondimensional
$N'_{\dot{v}}$	=	turunan momen arah <i>yaw</i> terhadap \dot{v} nondimensional
$N'_{\dot{r}}$	=	turunan momen arah <i>yaw</i> terhadap \dot{r} nondimensional
Y'_{δ}	=	Turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap defleksi <i>rudder</i> (δ) nondimensional
N'_{δ}	=	Turunan gaya arah <i>yaw</i> terhadap defleksi <i>rudder</i> (δ) nondimensional
$Y_{\dot{v}}$	=	turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap \dot{v} (Ndet ² /m)
$Y_{\dot{r}}$	=	turunan gaya arah <i>sway</i> terhadap \dot{r} (Ndet ² /m)
$N_{\dot{v}}$	=	turunan momen arah <i>yaw</i> terhadap \dot{v} (Ndet ² /m)
$N_{\dot{r}}$	=	turunan momen arah <i>yaw</i> terhadap \dot{r} (Ndet ² /m)
C_X	=	Koefisien gaya angin pada arah <i>surge</i>
C_Y	=	Koefisien gaya angin pada arah <i>sway</i>
C_N	=	Koefisien momen angin pada arah <i>yaw</i>
V_R	=	Kecepatan angin relatif (knot)
ρ_w	=	densitas udara (kg/m ³)
A_T	=	Luasan transversal (m ²)
A_L	=	Luasan lateral (m ²)
A_{ss}	=	Luasan lateral dari <i>superstructure</i> (m ²)
γR	=	Arah angin (derajat)
Y_w	=	Gaya angin terhadap arah <i>sway</i> (N)
N_w	=	Momen angin terhadap arah <i>yaw</i> (Nm)

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara kepulauan yang terdiri atas pulau-pulau yang dipisahkan oleh lautan (perairan). Luas wilayah perairan Indonesia mencapai nilai kurang lebih 5.193.250 km² terletak pada posisi silang antara dua benua, Asia dan Australia, dan antara dua samudra Hindia dan Pasifik. Kondisi wilayah Indonesia yang terpisah menjadi pulau-pulau dan dipisahkan oleh lautan membuat pentingnya transportasi laut di Indonesia yaitu dengan menggunakan kapal dan pelabuhan sebagai tempat berlabuh. Terdapat banyak pelabuhan yang dimiliki Indonesia yang tersebar di setiap pulau. Salah satu nama pelabuhan yang berada di Indonesia adalah Pelabuhan Arun.

Pelabuhan Arun merupakan pelabuhan yang terletak di ujung utara pulau Sumatera tepatnya di provinsi Nangroe Aceh Darussalam. Pelabuhan Arun merupakan pelabuhan milik PT Perta Arun Gas yang berfungsi sebagai terminal penerimaan dan regasifikasi LNG (*Liquefied Natural Gas*) yang berasal dari lapangan Tangguh di Kabupaten Teluk Bintuni Papua. Jenis kapal yang digunakan untuk mengangkut LNG menuju ke Pelabuhan Arun adalah kapal LNG. Kapal LNG sendiri merupakan kapal yang di desain untuk mengangkut barang dalam bentuk cair dan dalam jumlah yang besar.

Setiap pelabuhan tentu memiliki suatu jalur khusus yang dapat digunakan kapal untuk masuk ke pelabuhan atau keluar dari pelabuhan menuju ke lautan lepas. Jalur masuk dan keluar kapal memiliki titik-titik lintasan yang berbeda. Hal ini bertujuan agar tidak terjadi tabrakan antar kapal yang beroperasi di pelabuhan. Namun kenyataan kapal dapat mengalami gangguan dari lingkungan yang dapat menyebabkan posisi kapal tidak tepat pada jalur yang ditentukan. Jika hal tersebut terjadi akan mengakibatkan kapal akan membutuhkan waktu lebih lama untuk sampai pada jalurnya. Salah satu cara untuk meminimalisir terjadi kesalahan lintasan pada saat kapal berlayar adalah dengan menerapkan sistem kendali *maneuvering* kapal LNG Tangguh Towuti dengan membandingkan posisi yang ditentukan dengan

posisi aktual kapal. *Maneuvering* gerakan kapal dapat dihasilkan oleh kinerja dari aktuator. Aktuator yang dimiliki oleh suatu kapal diantaranya adalah *propeller*, *thruster* dan *rudder* dimana ketiganya digunakan untuk membuat kapal dapat bergerak sesuai dengan jalur yang diinginkan (Cahyoko, 2016).

Sistem kendali pada *maneuvering* kapal didasarkan pada metode perancangannya, dapat dibedakan dalam 4 metode, yaitu metode konvensional, adaptif, modern dan berbasis kepakaran. Sistem yang digunakan dalam perancangan kendali juga memiliki 2 macam bentuk yakni bentuk sistem deterministik dan stokastik. Kapal bergerak atau bekerja dalam suatu dimensi ruang yang berpindah dari keadaan satu ke keadaan berikutnya yang dapat dinyatakan dalam bentuk sistem *state-space* (ruang keadaan). Salah satu strategi pengendalian optimal yang dapat diterapkan dalam *plant* dengan bentuk *state space* adalah LQG (*Linear Quadratic Gaussian*) (Rodliyah, Dinayati, dkk, 2010). LQG merupakan metode sistem kendali modern yang menggunakan bentuk sistem stokastik dalam perancangannya. Tugas akhir ini menerapkan sistem kendali optimal *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) sebagai dasar sistem kendali kapal agar memiliki nilai *error* minimal pada lintasannya.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan penelitian yang diangkat dalam pengerjaan tugas akhir ini antara lain.

1. Apakah sistem kendali *optimal tracking* mampu bekerja pada saat kapal memiliki beban penuh (*deadweight ton*)?
2. Apakah sistem kendali *optimal tracking* mampu bekerja pada saat ada gangguan angin?

1.3 Tujuan

Tujuan penelitian yang ingin dicapai dalam pengerjaan tugas akhir ini antara lain.

1. Mendapatkan sistem kendali *optimal tracking* yang mampu bekerja pada saat kapal memiliki beban penuh (*deadweight ton*).
2. Mendapatkan sistem kendali *optimal tracking* yang mampu bekerja pada saat ada gangguan angin.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Kapal yang digunakan terbatas pada kapal LNG Tangguh Towuti.
2. Distribusi massa kapal bersifat homogen.
3. Model dinamika kapal menggunakan bentuk *state-space* (ruang keadaan) dengan menggunakan metode Davidson and Schiff.
4. Gangguan lingkungan yang diperhatikan adalah angin
5. Sistem *optimal tracking control* menggunakan metode strategi optimal *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) untuk mendapatkan *error* lintasan minimal.
6. Variabel yang dikendalikan adalah 2 derajat kebebasan (*degree of freedom*) yakni *sway* dan *yaw* dengan asumsi bahwa secara eksperimen gerak *surge*, *pitch*, *roll* dan *heave* tidak berpengaruh pada gerak *maneuvering* kapal.
7. Penelitian dilakukan secara simulasi dengan bantuan *software* MATLAB R2009a.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Bab I ini terdiri dari latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah dan sistematika laporan.

BAB II Teori Penunjang

Bab II ini dibahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan, seperti model dinamika kapal, sistem kendali optimal *Linear Quadratic Gaussian*, dan sistem pengendali *tracking optimal*.

BAB III Metodologi Penelitian

Bab ini berisi mengenai rancangan dari penelitian yang dilakukan, metode, dan langkah-langkah dalam penelitian.

BAB IV Analisis Data dan Pembahasan

Bab ini berisi tentang data hasil penelitian dari simulasi sistem kendali lintasan kapal menggunakan kendali optimal *Linear Quadratic Gaussian* dan analisis dari performansi sistem kendali menggunakan *Linear Quadratic Gaussian*.

BAB V Kesimpulan dan Saran

Bab ini diberikan kesimpulan tentang tugas akhir yang telah dilakukan berdasarkan data-data yang diperoleh, serta diberikan saran sebagai penunjang maupun pengembangan tugas akhir selanjutnya.

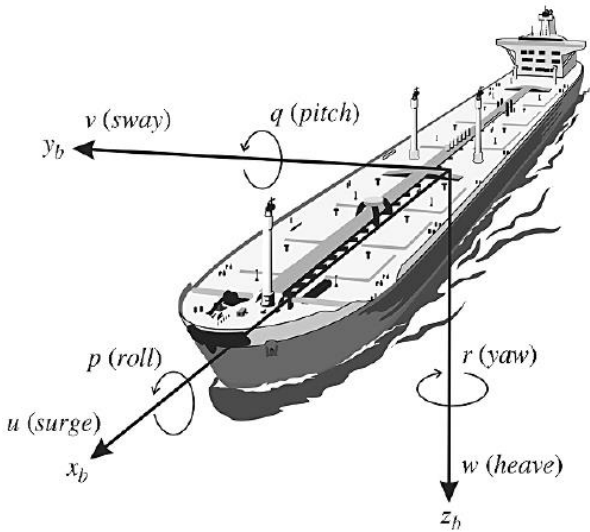
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Model Dinamika Kapal

Pemodelan gerak dinamika kapal terbagi atas 6 derajat kebebasan (*Degree of Freedom*) yaitu antara lain *heave*, *surge*, *sway*, *yaw*, *pitch*, *roll*. Dalam suatu perancangan sistem kendali, pada umumnya menggunakan gerak *surge*, *sway* dan *yaw*. Masing-masing gerak memiliki besaran posisi, kecepatan dan gaya/ momen yang ditunjukkan oleh simbol-simbol dalam Tabel 2.1. Serta diilustrasikan pada Gambar 2.1.

Tabel 2. 1 Derajat Kebebasan Gerak Kapal (Fossen, 1994)

DOF	Gerakan Kapal	Posisi dan Sudut	Kecepatan Linier dan Angular	Gaya dan Momen
1	Translasi sumbu-x (<i>surge</i>)	x	u	X
2	Translasi sumbu-y (<i>sway</i>)	y	v	Y
3	Translasi sumbu-z (<i>heave</i>)	z	w	Z
4	Rotasi sumbu-x (<i>roll</i>)	Φ	p	K
5	Rotasi sumbu-y (<i>pitch</i>)	θ	q	M
6	Rotasi sumbu-z (<i>yaw</i>)	Ψ	r	N



Gambar 2. 1 Gerakan Kapal (Fossen, 1994)

Bentuk umum persamaan kendali manuver kapal diturunkan dari hukum Newton II dapat dituliskan dalam bentuk persamaan 2.1 (Fossen, 2011)

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{D}\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau}_L \quad (2.1)$$

di mana :

\mathbf{M} = matriks inersia

$\dot{\mathbf{v}}$ = vektor percepatan $[\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}]^T$

\mathbf{D} = matriks redaman

\mathbf{v} = vektor kecepatan $[u, v, r]^T$

Penurunan persamaan kendali *maneuvering* kapal didasarkan pada beberapa asumsi sebagai berikut :

- a. Distribusi massa homogen dan bidang xz simetris ($I_{xy} = I_{yz} = 0$)
- b. Gerakan *heave*, *roll* dan *pitch* diabaikan ($w = p = q = 0$)

Asumsi-asumsi di atas digunakan untuk mendapatkan persamaan gerak *sway* dan *yaw* yang ditunjukkan pada persamaan (2.3) hingga (2.3)

$$Sway : m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) = Y \quad (2.2)$$

$$Yaw : I_Z \dot{r} + m x_G (\dot{v} + ur) = N \quad (2.3)$$

Pemodelan dinamika kapal dapat dilakukan dengan dua macam yang sering digunakan dalam merancang sistem kendali yakni Model Davidson & Schiff (1946) dan Model Nomoto (1957). Kedua model tersebut menggunakan variabel gerak kapal berupa *sway*, *yaw* (v, r) dan input kendali berupa *defleksi* (δ).

2.1.1 Pemodelan Gerak Kapal 2 DOF (Model Davidson and Schiff)

Pemodelan gerak kapal oleh Davidson dan Schiff terdiri dari turunan gaya dan momen hidrodinamika kapal 2 DOF yakni *sway* dan *yaw* dengan asumsi nilai *surge* sangat kecil (Cahyoko, 2016).

Berdasarkan pada pemodelan gerak kapal oleh Davidson dan Schiff terdiri dari turunan gaya dan momen hidrodinamika kapal 2 DOF yakni *sway* dan *yaw* dengan asumsi nilai *surge* sangat kecil.

$$Sway : Y = Y_v \dot{v} + Y_r \dot{r} + Y_v v + Y_r r + Y_\delta \delta \quad (2.4)$$

$$Yaw : N = N_v \dot{v} + N_r \dot{r} + N_v v + N_r r + N_\delta \delta \quad (2.5)$$

Persamaan gerak *sway*, dan *yaw* disubstitusikan dalam persamaan 2.6.

$$M \dot{v} + N(u_0) v = b \delta_R \quad (2.6)$$

M = matriks inersia

\dot{v} = vektor percepatan $[\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}]^T$

$N(u_0)$ = matriks redaman

v = vektor kecepatan $[u, v, r]^T$

b = matriks gaya dan momen

Nilai matiks inersia (M), redaman ($N(u_0)$) dan gaya/momen *rudder* (b) didapatkan nilainya menggunakan persamaan 2.7 hingga 2.9.

$$M = \begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_g - Y_{\dot{r}} \\ mx_g - N_{\dot{v}} & I_Z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$N(u_0) = \begin{bmatrix} -Y_v & mu_0 - Y_r \\ -N_v & mx_g u_0 - N_r \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$b = \begin{bmatrix} Y_{\delta} \\ N_{\delta} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Bentuk umum persamaan *state space* (ruang keadaan) model dinamika kapal ditunjukkan oleh persamaan 2.10. (Fossen, 1994)

$$\dot{x} = Ax + b_1 \delta_R \quad (2.10)$$

Nilai matriks A dan matriks B didapatkan dari persamaan 2.11.

$$A = -M^{-1}N \quad B = M^{-1}b \quad (2.11)$$

Matriks A dan B memiliki elemen-elemen nilai pada tiap baris dan kolomnya yang dikarenakan operasi matriks M , N dan b (Lampiran A). Matriks A dan B akan memiliki bentuk matriks seperti yang ditunjukkan oleh persamaan 2.12 dan 2.13

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Variabel-variabel penyusun matriks M dan N(u₀) didapatkan dari persamaan koefisien hidrodinamika yang dinyatakan pada persamaan 2.14 hingga 2.25 :

$$\frac{-Y'_{\psi}}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.16 \frac{C_B B}{T} - 5.1 \left(\frac{B}{L} \right)^2 \quad (2.14)$$

$$\frac{-Y'_{\psi}}{\pi(T/L)^2} = 0.67 \left(\frac{B}{L} \right) - 0.0033 \left(\frac{B}{T} \right)^2 \quad (2.15)$$

$$\frac{-N'_{\psi}}{\pi(T/L)^2} = 1.1 \left(\frac{B}{L} \right) - 0.041 \left(\frac{B}{T} \right) \quad (2.16)$$

$$\frac{-N'_{\psi}}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{12} + 0.017 \frac{C_B B}{T} - 0.33 \left(\frac{B}{L} \right) \quad (2.17)$$

$$\frac{-Y'_{\psi}}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.14 \frac{C_B B}{T} \quad (2.18)$$

$$\frac{-Y'_{\psi}}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{2} + 2.2 \left(\frac{B}{L} \right) - 0.08 \left(\frac{B}{L} \right) \quad (2.19)$$

$$\frac{-N'_{\psi}}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{2} + 2.4 \left(\frac{T}{L} \right) \quad (2.20)$$

$$\frac{-N'_{\psi}}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{4} + 0.039 \left(\frac{B}{T} \right) - 0.56 \left(\frac{B}{L} \right) \quad (2.21)$$

$$Y'_{\delta} = \rho \frac{\pi A_{\delta}}{4LT} \quad (2.22)$$

$$N'_{\delta} = -\frac{1}{2} Y'_{\delta} \quad (2.23)$$

$$I'_{\psi} = m'_{\psi} r'^2 \quad (2.24)$$

$$I'_z = m' \cdot X'_G + I'_r \quad (2.25)$$

Persamaan 2.14 hingga 2.25 merupakan bentuk persamaan koefisien hidrodinamika nondimensional. Bentuk nondimensional pada koefisien hidrodinamika dapat diubah menjadi persamaan dimensional menggunakan metode normalisasi.

2.1.2 Bentuk Normalisasi

Persamaan model dinamika kapal memiliki bentuk non dimensi. Cara yang dapat digunakan untuk merubah persamaan non dimensi menjadi dimensi adalah menggunakan metode normalisasi SNAME. Metode normalisasi memiliki 3 jenis yakni *Prime-System I*, *Prime-System II* dan *Bis-System*. *Prime-System I* menggunakan parameter kecepatan kapal dan panjang kapal. *Prime-System II* bersumber dari adanya *wing theory*, sedangkan *Bis-System* digunakan pada benda yang diam di laut seperti kilang minyak. (Milatina, 2016)

Koefisien hidrodinamika kapal yang digunakan dalam pemodelan dinamika kapal didapatkan dari parameter-parameter kapal dengan ukuran lebih kecil (*prototype*), untuk dapat digunakan pada kapal yang berukuran lebih besar maka diperlukan normalisasi pada koefisien hidrodinamika. Normalisasi memiliki tiga bentuk yang ditunjukkan pada tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Normalisasi Model Dinamika Kapal (Fossen, 1994)

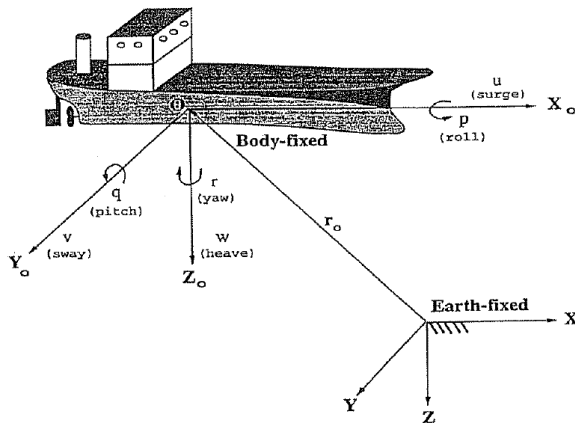
Besaran	<i>Prime-System I</i>	<i>Prime-System II</i>	<i>Bis-System</i>
Panjang	L	L	L
Massa	$\frac{1}{2} \rho L^3$	$\frac{1}{2} \rho L^2 T$	$\mu \rho \nabla$
Momen inesia	$\frac{1}{2} \rho L^5$	$\frac{1}{2} \rho L^4 T$	$\mu \rho \nabla L^2$
Waktu	L/U	L/U	$\sqrt{L/g}$
Area Referensi	L ²	LT	$\mu \nabla / L$
Posisi	L	L	L
Sudut	1	1	1

Besaran	<i>Prime-System I</i>	<i>Prime-System II</i>	<i>Bis System</i>
Kecepatan Linier	U	U	\sqrt{Lg}
Kecepatan Angular	U/L	U/L	$\sqrt{g/L}$
Percepatan Linier	U^2/L	U^2/L	G
Percepatan Angular	$U^2 L^2$	$U^2 L^2$	g/L
Gaya	$\frac{1}{2} \rho U^2 L^2$	$\frac{1}{2} \rho U^2 LT$	$\mu \rho g \nabla$
Momen	$\frac{1}{2} \rho U^2 L^3$	$\frac{1}{2} \rho U^2 L^2 T$	$\mu \rho g \nabla L$

Bentuk normalisasi yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah bentuk *Prime-System I* yang pada umumnya digunakan dalam sistem *manuevering* kapal.

2.2 Model Kinematik Kapal

Ketika melakukan analisa pada gerakan kapal pada 6 derajat kebebasan (DOF) dapat dilakukan dengan sederhana menggunakan koordinat $X_0 Y_0 Z_0$ yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 sebagai acuan dimensi kapal.



Gambar 2. 2 Acuan Dimensi Kapal (Fossen, 1994)

Gerakan kapal 6 DOF dapat dinotasikan pula menjadi vektor-vektor yang ditunjukkan oleh persamaan 2.26 hingga 2.28 :

$$\eta = [\eta_1^T, \eta_2^T]^T; \quad \eta_1 = [x, y, z]^T; \quad \eta_2 = [\phi, \theta, \psi]^T \quad (2.26)$$

$$\nu = [\nu_1^T, \nu_2^T]^T; \quad \nu_1 = [u, v, w]^T; \quad \nu_2 = [p, q, r]^T \quad (2.27)$$

$$\tau = [\tau_1^T, \tau_2^T]^T; \quad \tau_1 = [X, Y, Z]^T; \quad \tau_2 = [K, M, N]^T \quad (2.28)$$

Simbol η merupakan notasi untuk vektor posisi dan orientasi, ν notasi untuk vektor kecepatan linier dan angular τ merupakan notasi untuk vektor gaya dan momen pada gerak kapal. Sistem kendali gerak kapal pada lintasannya, orientasi sering ditunjukkan dengan sebutan *Euler Angles*. Letak koordinat kapal dapat diperoleh dengan menggunakan suatu transformasi kecepatan yang dituliskan dalam persamaan (2.29).

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2) \nu_1 \quad (2.29)$$

Simbol $J_1(\eta_2)$ merupakan matriks transformasi yang berhubungan dengan fungsi dari sudut euler (*Euler Angles*) yakni *roll* (Φ), *pitch* (θ), *yaw*(ψ) yang merupakan sudut-sudut untuk transformasi pada kecepatan linier. Persamaan 2.30 merupakan bentuk matriks transformasi untuk mendapatkan posisi kapal berdasarkan kecepatan liniernya (Fossen, 1994).

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\phi + s\psi s\phi c\theta \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

2.3 Strategi Optimal *Linear Quadratic Gaussian* (LQG)

Sistem optimal adalah sistem yang mempunyai unjuk kerja terbaik (*best performance*) terhadap suatu acuan tertentu. Sistem kendali optimal memerlukan adanya suatu kriteria optimasi yang dapat meminimumkan hasil pengukuran dengan deviasi perilaku

sistem terhadap perilaku idealnya (Abdullah, 2015). Salah satu sistem optimal yang dapat diaplikasikan dalam kendali gerakan kapal adalah *optimal tracking control* yang merupakan sebuah sistem kendali pergerakan kapal agar tepat pada jalur lintasan yang diinginkan. Terdapat beberapa macam strategi optimal yang dapat diterapkan dalam kendali gerak kapal antara lain Kalman Filter, *Linear Quadratic Regulator* (LQR), *Linear Quadratic Gaussian* (LQG), H_{∞} , dan lain sebagainya. Tugas akhir ini, strategi yang akan diterapkan dalam kendali gerak kapal LNG beban penuh adalah *Linear Quadratic Gaussian* (LQG).

Persamaan sistem kapal bentuk ruang keadaan (*state space*) yang digunakan dalam sistem *optimal tracking* harus memenuhi persyaratan keterkendalian dan keteramatan (Juliana, 2014). Jika sistem tidak memenuhi syarat keterkendalian dan keteramatan maka sistem tidak dapat dikendalikan atau dikontrol. Keterkendalian merupakan jika perubahan keadaan 1 (x_1) ke keadaan selanjutnya (x_2) dapat ditentukan waktunya. Keterkendalian suatu sistem dapat dilihat dari nilai determinan matriks keterkendalian (*controllability*). Bentuk matriks keterkendalian didapatkan dengan menggunakan persamaan 2.31, jika nilai dari determinan $|M_c|$ tidak sama dengan nol, maka sistem dikatakan terkendali (Ogata, 2010).

$$M_c = [B \mid A*B \mid \dots \mid A^{n-1}*B] \quad (2.31)$$

Syarat kedua yaitu keteramatan sistem. Suatu sistem didefinisikan teramati, jika perubahan keadaan 1 (x_1) ke keadaan selanjutnya (x_2) dapat diamati. Keteramatan suatu sistem dapat dilihat dari nilai determinan matriks keterkendalian (*observability*). Bentuk matriks keteramatan didapatkan dengan menggunakan persamaan 2.32, jika nilai dari determinan $|M_o|$ tidak sama dengan nol, maka sistem dikatakan teramati.

$$M_o = \begin{bmatrix} C \\ C * A \\ \vdots \\ C * A^{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Linear Quadratic Gaussian (LQG) merupakan metode optimal yang berasal dari gabungan dua macam metode optimal sebelumnya yaitu *Linear Quadratic Regulator* dan Kalman Filter (Supriyono, 2011). *Linear Quadratic Control* merupakan salah satu metode dalam perancangan sistem kontrol optimal. *Plant* diasumsikan bersifat sistem linier, dalam bentuk persamaan keadaan, dan fungsi obyektif adalah fungsi kuadrat dari keadaan *plant* dan sinyal *input* kendali. Permasalahan dapat dirumuskan dan dipecahkan pada kawasan frekuensi menggunakan fungsi alih. Metode optimal dengan *linear quadratic regulator* (LQR) adalah dengan menentukan sinyal masukan yang akan memindahkan suatu *state* sistem linier dari kondisi awal $x(t_0)$ menuju ke suatu kondisi akhir $x(t)$ yang meminimumkan suatu indeks unjuk kerja performansi kuadratis (Baihaqie, Muhammad Zulizar, et all, 2014). Filter Kalman adalah estimator optimum yang mengestimasi *state* dari suatu sistem linear yang berkembang secara dinamis terhadap fungsi waktu. Estimator optimum dapat didefinisikan sebagai suatu algoritma yang memproses seluruh data yang tersedia untuk memberikan sebuah estimasi dari “*state*” suatu sistem, sedangkan pada waktu yang sama mengestimasi beberapa kriteria pengoptimalan yang sudah diketahui sebelumnya. Sehingga dapat dikatakan bahwa kendali optimal dengan metode *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) merupakan metode kendali modern yang diterapkan dalam bentuk ruang keadaan (*state space*) yang digunakan untuk mendesain optimal *regulator*. Pada konsep metode LQG diperkenalkan konsep teori pemisahan atau sering disebut dengan *Certainy Equivalence Principle* (Rodliyah, Dinayati, et all, 2010). Model *state space* yang digunakan ditunjukkan oleh persamaan 2.28 dan 2.29.

$$\dot{x} = Ax + Bu + Gw \quad (2.33)$$

$$y = Cx + v \quad (2.34)$$

Keterangan :

u = Input proses

y = Output proses

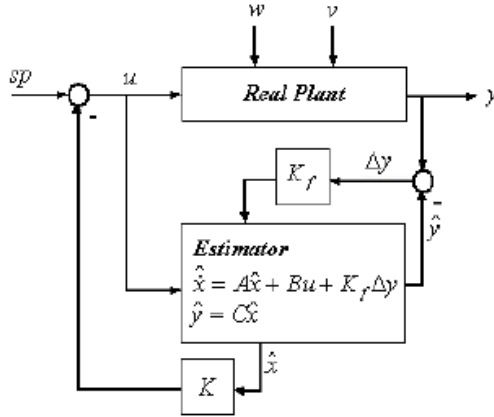
w = gangguan proses

v = gangguan pengukuran (*white noise*)

$$u = -Kx + r$$

K merupakan *gain* umpan balik atau disebut sebagai regulator, r merupakan *set point* atau masukan proses. Sehingga dapat dituliskan persamaan sistem menjadi persamaan 2.35.

$$\dot{x} = (A - BK)x + Br + Gw \quad (2.35)$$



Gambar 2. 3 Diagram Blok Sistem LQG (Lewis, Vrabie, & Syrmos, 2012)

Gambar 2.3. ditunjukkan bahwa untuk mencari sinyal kendali optimal u memerlukan suatu *gain* penguat pengendalian yaitu K (*regulator*) dan penguat *estimator* K_f (Kalman Filter) yang bernilai optimal. Berdasarkan teori pemisahan dijelaskan bahwa nilai K dan K_f dapat diperoleh secara terpisah. Nilai K dapat diperoleh dengan metode LQR (*Linear Quadratic Regulator*)

$$K = -R_c^{-1} B^T S \quad (2.36)$$

Nilai S didapatkan dari

$$A^T S + SA - SBR_c^{-1}B^T S + Q_c = 0 \quad (2.37)$$

Nilai K_f optimal didapatkan dengan dilakukan dengan sistem bersifat stokastik yakni dengan index performansi kesalahan minimum.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q_c x + u^T R_c u) dt \quad (2.38)$$

Nilai $Q_c \geq 0$, $R_c > 0$, Q_c digunakan untuk menentukan matriks keadaan sedangkan R_c menentukan matriks kendali. Nilai Q_c dan R_c tergantung dengan pendesain. Nilai Q_c dan R_c dapat diperoleh dengan metode *trial and error* atau berdasarkan Bryson's Rule yang menunjukkan pemilihan matriks Q dan R dapat dimulai dengan:

$$Q = 1/\text{nilai } y^2 \text{ max yg diperbolehkan} \quad (2.39)$$

$$R = 1/\text{nilai } u^2 \text{ max yg diperbolehkan} \quad (2.40)$$

Kalman Filter atau estimator bekerja berdasarkan sifat rekursif. Optimasi dilakukan dengan cara menekan nilai *error* sekecil mungkin. Indeks performansi atau *cost function* dapat dinyatakan dalam persamaan

$$J = E \{ [\hat{x} - x]^T [\hat{x} - x] \} \quad (2.41)$$

Nilai \hat{x} merupakan nilai estimasi dari variabel x fungsi waktu. Estimasi variabel dalam keadaan optimal \hat{x} dapat diperoleh dari persamaan dinamik Kalman Filter yang ditunjukkan oleh persamaan 2.42 dan 2.43. (Lewis, Vrabie, & Syrmos, 2012)

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \quad (2.42)$$

$$\hat{\hat{x}} = (A - LC)\hat{x} + Bu + Ly \quad (2.43)$$

Nilai penguat Kalman Filter berasal dari persamaan 2.44.

$$K_f = P C^T R_f^{-1} \quad (2.44)$$

Matriks P didapatkan dari persamaan Riccati yang ditunjukkan 2.45.

$$P A^T + A P - P C^T R_f^{-1} C P + Q = 0 \quad (2.45)$$

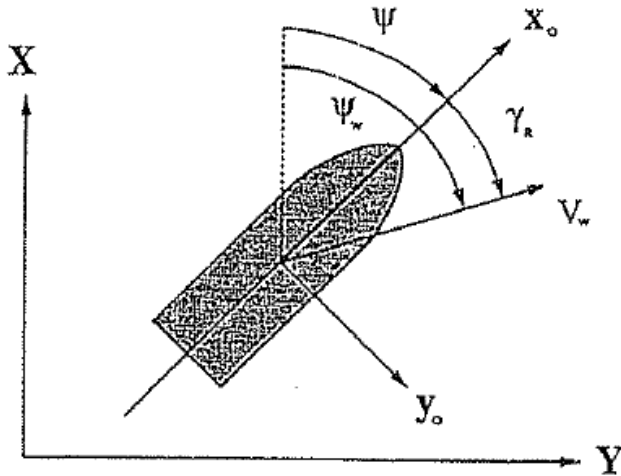
Nilai A dan B diasumsi terkendali dan C teramati dengan nilai $Q_c \geq 0$, $R_c > 0$.

Nilai gain K dan K_f dapat ditentukan menggunakan function yang tersedia dalam MATLAB. ain regulator (K) yang didapatkan dengan menggunakan function “lqr” yang menggunakan matriks A,B,C,D sebagai sistem dan nilai Q dan R yang telah ditentukan lebih dulu berdasarkan nilai aturan Bryson. Nilai *gain* estimator L didapatkan dengan cara menentukan nilai $a = \text{eig}(A-B*K1)$ kemudian di *transpose* menjadi a' , gain estimator menggunakan *command* $L = \text{place}(A', C', a')$. Langkah tersebut digunakan untuk sistem tanpa gangguan dari lingkungan maupun *noise* pengukuran.

Sistem yang memiliki gangguan lingkungan seperti gangguan beban angin terdapat perbedaan pada penentuan nilai *gain* estimator. Nilai gain estimator ditentukan menggunakan *function* “kalman” pada MATLAB. *Function* ini dapat digunakan jika terdapat nilai *covariance* dari matriks gangguan lingkungan pada sistem. Setiap nilai L berbeda untuk nilai variasi gangguan angin yang berbeda pula. (Eide, 2011)

2.4 Pemodelan Gangguan Angin

Sistem kendali yang dirancang pada suatu *plant* tak lepas dari adanya gangguan baik itu dari dalam maupun dari luar plant atau yang sering disebut sebagai gangguan lingkungan (*disturbance*). Hal tersebut dialami pula saat merancang sistem kendali pada gerakan kapal ketika berlayar pada lintasannya. Salah satu gangguan lingkungan yang dapat memengaruhi gerak kapal adalah nilai kecepatan angin di lautan.



Gambar 2. 4 Kecepatan dan Arah Angin Pada Kapal (Fossen, 1994)

Gambar 2.4 dijelaskan bahwa resultan gaya dan momentum dari angin yang bekerja pada permukaan kapal didefinisikan sebagai kecepatan angin relatif V_R (km/jam) dan sudut γ_R (derajat) sesuai dengan persamaan 2.46.

$$V_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2} \quad \gamma_R = \tan^{-1} \left(\frac{v_R}{u_R} \right) \quad (2.46)$$

Nilai V_R dan γ_R pada sumbu x dan y dihitung menggunakan persamaan

$$u_R = V_{\text{wind}} \cos \gamma_R - u + u_c \quad (2.47)$$

$$v_R = V_{\text{wind}} \sin \gamma_R - v + v_c \quad (2.48)$$

Hambatan angin pada kapal dijelaskan oleh Isherwood (1972) sebagai gaya dan momen angin dalam persamaan 2.49-2.51.

$$X_{\text{wind}} = \frac{1}{2} C_X (\gamma_R) \rho_w V_R^2 A_T \quad (2.49)$$

$$Y_{\text{wind}} = \frac{1}{2} C_Y (\gamma_R) \rho_w V_R^2 A_L \quad (2.50)$$

$$N_{\text{wind}} = \frac{1}{2} C_N (\gamma_R) \rho_w V_R^2 A_T L \quad (2.51)$$

dengan:

C_X	: koefisien gaya dan momen angin
ρ_w	: densitas udara (kg/m ³)
V_R	: kecepatan angin relatif (knot)
A_T	: Luasan transversal (m ²)
A_L	: Luasan lateral (m ²)
A_{SS}	: Luasan lateral dari <i>superstructure</i> (m ²)
L	: Panjang keseluruhan kapal (m)
γ_R	: Arah angin (derajat)

$$C_X = A_0 + A_1 \frac{2A_L}{L^2} + A_2 \frac{2A_T}{B^2} + A_3 \frac{L}{B} + A_4 \frac{S}{L} + A_5 \frac{C}{L} + A_6 M \quad (2.52)$$

$$C_Y = B_0 + B_1 \frac{2A_L}{L^2} + B_2 \frac{2A_T}{B^2} + B_3 \frac{L}{B} + B_4 \frac{S}{L} + B_5 \frac{C}{L} + B_6 \frac{A_{SS}}{A_L} \quad (2.53)$$

$$C_N = C_0 + C_1 \frac{2A_L}{L^2} + C_2 \frac{2A_T}{B^2} + C_3 \frac{L}{B} + C_4 \frac{S}{L} + C_5 \frac{C}{L} \quad (2.54)$$

Nilai A_i dan B_i ($i=1\dots6$) dan C_j ($j=1\dots5$) ditampilkan pada Lampiran C.

2.5 Standar *Maneuvering* Kapal

Prosedur yang digunakan untuk uji *maneuvering* mengacu kepada peraturan standar kemampuan *maneuvering* kapal yang direkomendasikan oleh *International Maritime Organization* (IMO) yakni resolusi MSC.137 (76) annex.6 tertanggal 4 Desember 2002 dan mulai diterapkan sejak tanggal 1 Januari 2004, yang mana resolusi ini merupakan amandemen terhadap resolusi sebelumnya yakni A.751 (18) mengenai standar kemampuan *maneuvering* kapal. Mengacu kepada penjelasan resolusi tersebut di atas, sebagaimana yang telah direkomendasikan oleh *International Maritime Organization* (IMO), aturan standar yang dimaksud disini didasarkan atas pengertian bahwa kemampuan *maneuvering* kapal dapat dievaluasi berdasarkan karakteristik dari pengujian *maneuvering* seperti biasanya atau secara konvensional, dimana kapal yang

dimaksud adalah kapal yang memiliki panjang 100 meter atau lebih dengan menggunakan sistem propulsi dan sistem kemudi (*steering*) konvensional yakni gaya dorong kapal dihasilkan oleh *propeller* yang digerakan oleh poros *propeller*. IMO telah merekomendasikan beberapa kriteria standar untuk manuverabilitas kapal. Kriteria tersebut harus dipenuhi oleh sebuah kapal saat beroperasi baik di perairan yang dalam (*deep water*) maupun di perairan terbatas atau beroperasi di sekitar pelabuhan atau di perairan yang dangkal (*restricted and shallow water*). Standar pengujian yang diperlukan dalam *manuevering* kapal disyaratkan dalam IMO Resolusi MSC 137 76 (2002) antara lain:

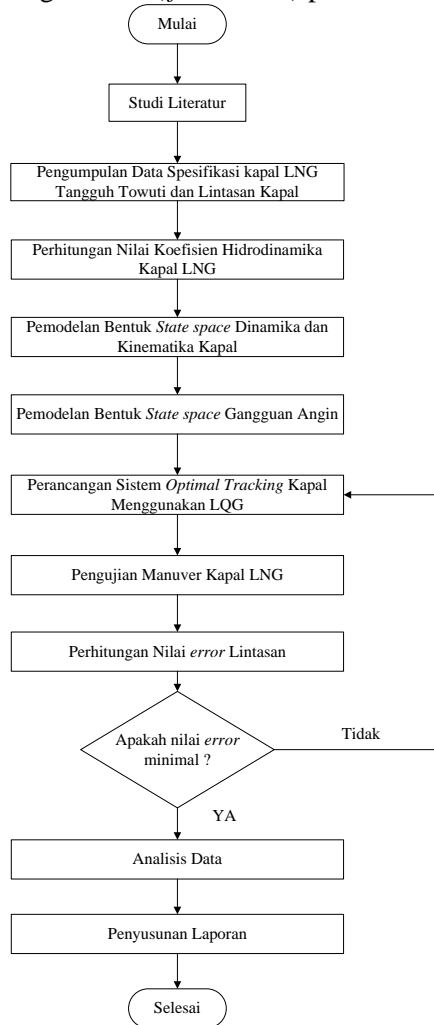
Tabel 2. 3 Standar Manuverabilitas dari IMO (**Resolution MSC, Vol.137, 2002**)

<i>Ability</i>	<i>Test</i>	<i>Criteria</i>
<i>Turning ability</i>	<i>Turning test with max. Rudder angle (35deg.)</i>	<i>Advanced</i> < 4,5 L <i>Tactical Diameter</i> < 5,0 L
<i>Initial turning ability</i>	<i>10°/ 10° Z-test</i>	<i>Distance ship run before 2nd rudder execution</i> < 2,5 L
<i>Stopping ability</i>	<i>Stopping test with full astem</i>	<i>Track reach</i> < 15 L

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini ditampilkan dengan sebuah diagram alir (*flowchart*) pada Gambar 3.1



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.1 Studi Literatur

Studi literatur dimaksud untuk membangun pemahaman awal hingga mendalam secara teoritis terhadap materi yang mendukung pada penelitian tugas akhir ini antara lain pemodelan dinamika kapal beserta perubahan parameter-parameter kapal, sistem kendali LQG, persamaan kinematik kapal dan memahami tentang *optimal tracking control* dengan menganalisa pergerakan kapal pada lintasannya.

3.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data yang diperlukan dalam tugas akhir ini yakni berupa data spesifikasi kapal LNG Tangguh Towuti dan data jalur pelayaran kapal keluar dari Pelabuhan Arun. Data spesifikasi kapal LNG Tangguh Towuti ini ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Data Spesifikasi Kapal LNG Tangguh Towuti

Besaran	Nilai	satuan	Nilai	Satuan SI
Lpp (panjang)	274.4	m	274.4	M
U (kecepatan)	19.65	knot	10.1088246	m/s
B (Lebar)	43.4	m	43.4	M
T (Tinggi)	26	m	26	M
C _B (koefisien blok)	0.7561		0.7561	
XG (<i>specific gravity</i>)	0		0	
A _δ (luasan rudder)	63.41	m ²	63.41	m ²
m (massa)	118296.4	ton	118296400	Kg
R (jari-jari girasi)	0.2 Lpp		54.88	M
m' (massa non dimensional)	1.1293E-05		0.01129305	
XG' (<i>specific gravity</i> non dimensional)	0		0	
DWT (<i>Deadweight Ton</i>)	87697	ton	87697000	Kg

Tabel 3.1 (Lanjutan)

Besaran	Nilai	satuan	Nilai	Satuan SI
ρ (massa jenis)	1014	kg/m ³	1014	kg/m ³

Data jalur pelayaran kapal keluar dari Pelabuhan Arun berupa titik koordinat *latitude* dan *longitude* dengan satuan derajat lintang dan bujur yang kemudian dikonversikan menjadi satuan kilometer (km) dengan cara dikalikan 111,32 km.

Tabel 3. 2 Konversi Lintasan Kapal Dalam Kilometer

No	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Latitude</i> (km)	<i>Longitude</i> (km)
1	5.2192	97.0990	581.0013	10809.0607
2	5.2192	97.0994	581.0013	10809.1052
3	5.2192	97.0998	581.0013	10809.1497
4	5.2191	97.1003	580.9902	10809.2054
5	5.2191	97.1009	580.9902	10809.2722
6	5.2191	97.1016	580.9902	10809.3501
7	5.2190	97.1022	580.9791	10809.4169
8	5.2190	97.1029	580.9791	10809.4948
9	5.2191	97.1034	580.9902	10809.5505
10	5.2193	97.1042	581.0125	10809.6395
11	5.2198	97.1050	581.0681	10809.7286
12	5.2203	97.1055	581.1238	10809.7843
13	5.2210	97.1059	581.2017	10809.8288
14	5.2218	97.1062	581.2908	10809.8622

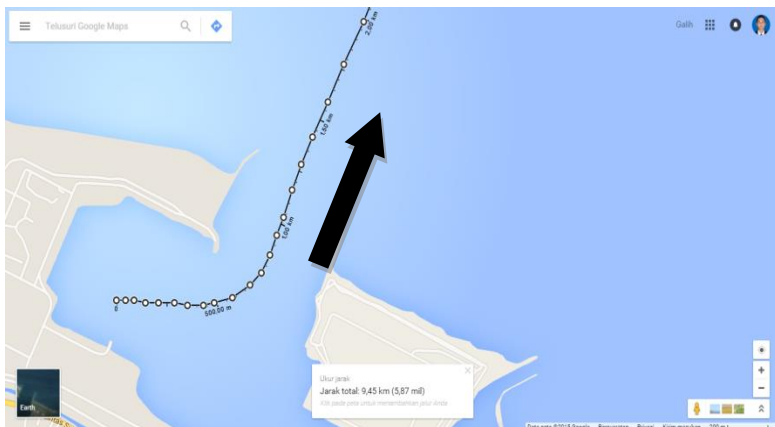
Tabel 3.2 (Lanjutan)

No	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Latitude</i> (km)	<i>Longitude</i> (km)
15	5.2225	97.1065	581.3687	10809.8956
16	5.2236	97.1069	581.4912	10809.9401
17	5.2246	97.1073	581.6025	10809.9846
18	5.2257	97.1078	581.7249	10810.0403
19	5.2271	97.1085	581.8808	10810.1182
20	5.2286	97.1092	582.0478	10810.1961
21	5.2303	97.1101	582.2370	10810.2963
22	5.2321	97.1109	582.4374	10810.3854
23	5.2340	97.1117	582.6489	10810.4744
24	5.2363	97.1126	582.9049	10810.5746
25	5.2387	97.1134	583.1721	10810.6637
26	5.2413	97.1143	583.4615	10810.7639
27	5.2442	97.1153	583.7843	10810.8752
28	5.2471	97.1163	584.1072	10810.9865
29	5.2502	97.1172	584.4523	10811.0867
30	5.2534	97.1182	584.8085	10811.1980
31	5.2566	97.1191	585.1647	10811.2982
32	5.2600	97.1200	585.5432	10811.3984
33	5.2633	97.1210	585.9106	10811.5097

Tabel 3.2 (Lanjutan)

No	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Latitude</i> (km)	<i>Longitude</i> (km)
34	5.2670	97.1222	586.3224	10811.6433
35	5.2707	97.1234	586.7343	10811.7769
36	5.2742	97.1246	587.1239	10811.9105
37	5.2784	97.1264	587.5915	10812.1108
38	5.2817	97.1283	587.9588	10812.3224
39	5.2855	97.1305	588.3819	10812.5673
40	5.2892	97.1326	588.7937	10812.8010
41	5.2925	97.1345	589.1611	10813.0125

Selain nilai tiap titik lintasan kapal keluar dari pelabuhan, lintasan juga diilustrasikan dalam Gambar 3.2.

**Gambar 3. 2** Jalur Keluaran Kapal dari Pelabuhan Arun

Jalur pelayaran di Pelabuhan Arun yang ditunjukkan Gambar 3.2 merupakan jalur yang digunakan kapal ketika akan keluar dari pelabuhan. Ketika kapal akan masuk ke pelabuhan memiliki jalur yang berbeda ketika kapal akan keluar dari pelabuhan. Hal ini bertujuan agar tidak terjadi tabrakan antar kapal. Jalur keluar kapal diwakili dengan titik putih yang berjumlah 41 titik, dimana titik pertama merupakan tempat sandar kapal dan titik ke 41 merupakan daerah lautan lepas.

3.3 Pemodelan Dinamika Kapal LNG

Pemodelan dinamika kapal direpresentasikan dalam bentuk persamaan ruang keadaan (*state-space*). Terdapat dua macam kondisi dalam melakukan pemodelan dinamika kapal yakni kapal LNG dalam kondisi kosong dan kondisi beban penuh.

3.3.1 Pemodelan Dinamika Kapal Beban Kosong

Pemodelan dinamika pada kapal Tangguh Towuti dapat dilakukan secara matematis menggunakan pendekatan yang dilakukan oleh Davidson and Schiff dengan persamaan matriks 2 DOF yang ditunjukkan oleh persamaan 3.1 hingga 3.3. sebelumnya dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai koefisien hidrodinamika menggunakan regresi Clarke pada bab 2.1. Hasil perhitungan yang telah dilakukan menghasilkan nilai koefisien hidrodinamika untuk kapal LNG kosong ditampilkan pada tabel 3.3.

Tabel 3. 3 Koefisien Hidrodinamika Kapal LNG Kosong

Koefisien Hidrodinamika	Nilai
$Y\dot{v}'$	-0.03028704
$Y\mathbf{r}'$	-0.002728155
$N\dot{v}'$	-0.002975294
$N\mathbf{r}'$	-0.001482705
Yv'	-0.042422775
Yr'	0.008050722
Nv'	-0.02050617

Tabel 3.3 (Lanjutan)

Koefisien Hidrodinamika	Nilai
Nr'	-0.006386032
Yδ'	0.00697702
Nδ'	-0.003488509
Iz'	0.000451722
Ir'	0.000451722

Nilai koefisien hidrodinamika kapal akan menjadi elemen penyusun matriks M dan N untuk mendapatkan persamaan dinamika kapal model matematis Davidson and Schiff. Nilai hidrodinamika kapal LNG disubstitusikan ke dalam persamaan 2.7 sampai 2.9, sehingga didapatkan nilai matriks inersia, redaman, gaya dan momen pada kapal LNG kosong yang ditunjukkan oleh persamaan 3.1 sampai 3.3.

$$M = \begin{bmatrix} 0.11165243 & 2.01018455 \\ 0.00798937 & 1.42534220 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$N = \begin{bmatrix} 0.00419661 & -0.21853362 \\ 0.00202854 & 0.17334629 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$b = \begin{bmatrix} 0.00697702 \\ -0.00348851 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Matriks 3.1 sampai dengan 3.3 digunakan untuk melakukan perhitungan matriks-matriks penyusun persamaan *state space* dinamika kapal LNG kosong yang ditunjukkan pada persamaan 3.4 dan 3.5.

$$A = -M^{-1} N ; A = \begin{bmatrix} -0.01330599 & 4.61231646 \\ -0.00134861 & -0.14747042 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$B = M^{-1} b ; B = \begin{bmatrix} 0.11851311 \\ -0.00044524 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Sistem kendali lintasan kapal atau *steering* menggunakan gerak *sway* dan *yaw* harus menambahkan jumlah baris dan atau kolom pada setiap matriks 3.4 dan 3.5 guna memunculkan nilai perubahan sudut. (Fossen, 2011)

$$A = \begin{bmatrix} -0.01330599 & 4.61231646 & 0 \\ -0.00134861 & -0.14747042 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.11851311 \\ -0.00044524 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Persamaan *state space* kapal LNG Tangguh Towuti kosong memiliki nilai seperti pada persamaan 3.8 dan 3.9 .

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B u \\ Y &= C x + D \tau \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.01330599 & 4.61231646 & 0 \\ -0.00134861 & -0.14747042 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.11851311 \\ -0.00044524 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_R \quad (3.8)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + 0 \quad (3.9)$$

3.3.2 Pemodelan Dinamik Kapal Beban Penuh

Kapal dengan beban penuh merupakan kondisi dimana kapal mendapatkan tambahan beban DWT (*Deadweight Ton*). DWT kapal LNG Tangguh Towuti memiliki nilai sebesar 87697 ton atau sama dengan 87697000 Kilogram. Sehingga dengan adanya tambahan beban akan merubah nilai koefisien hidrodinamika dan persamaan fungsi alih kapal.

Tabel 3. 4 Koefisien Hidrodinamika Kapal LNG Beban Penuh

Koefisien Hidrodinamika	Nilai
Yvdot'	-0.03028704
Yrdot'	-0.002728155
Nvdot'	-0.002975294

Tabel 3.4 (lanjutan)

Koefisien Hidrodinamika	Nilai
Nrdot'	-0.001482705
Yv'	-0.042422775
Yr'	0.008050722
Nv'	-0.02050617
Nr'	-0.006386032
Yδ'	0.00697702
Nδ'	-0.003488509
Iz'	0.000786598
Ir'	0.000786598

Nilai koefisien hidrodinamika kapal akan menjadi elemen penyusun matriks M dan N untuk mendapatkan persamaan dinamika kapal model matematis Davison and Schiff seperti yang dilakukan pada kondisi kapal LNG kosong. Nilai hidrodinamika kapal LNG beban penuh disubstitusikan ke dalam persamaan 2.7 sampai 2.9, sehingga didapatkan nilai matriks inersia, redaman, gaya dan momen pada kapal LNG beban penuh yang ditunjukkan oleh persamaan 3.10 sampai 3.12.

$$M' = \begin{bmatrix} 0.13413300 & 2.01018456 \\ 0.00798937 & 1.67208889 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$N' = \begin{bmatrix} 0.00419661 & -0.21853362 \\ 0.00202854 & 0.17334629 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$b' = \begin{bmatrix} 0.00697702 \\ -0.00348851 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Matriks 3.10 sampai dengan 3.12 dapat dilakukan perhitungan matriks-matriks penyusun persamaan *state space* dinamika kapal LNG beban penuh pada persamaan 3.13 dan 3.14.

$$A' = -M'^{-1} N' ; A' = \begin{bmatrix} -0.01411645 & 3.42838426 \\ -0.00114573 & -0.12005159 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$B' = M'^{-1} b' ; B' = \begin{bmatrix} 0.08970584 \\ -0.00052367 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Sistem kendali lintasan kapal atau *steering* menggunakan gerak *sway* dan *yaw* harus menambahkan jumlah baris dan atau kolom pada setiap matriks guna memunculkan nilai perubahan sudut. (Fossen, 2011)

$$A' = \begin{bmatrix} -0.01411645 & 3.42838426 & 0 \\ -0.00114573 & -0.12005159 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$B' = \begin{bmatrix} 0.08970584 \\ -0.00052366 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Sehingga persamaan *state space* kapal LNG Tangguh Towuti beban penuh sesuai dengan persamaan 3.17 dan 3.18.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A'x + B'u \\ Y &= Cx + D\tau \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.01411645 & 3.42838426 & 0 \\ -0.00114573 & -0.12005159 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.08970584 \\ -0.00052367 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_R \quad (3.17)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + 0 \quad (3.18)$$

3.4 Matriks Transformasi Kinematika

Posisi kapal ketika berlayar akan mengalami perubahan tiap menitnya sesuai dengan jalur yang ditentukan. Salah satu cara mengetahui posisi kapal akibat sudut heading kapal adalah menggunakan matriks transformasi kinematik. Matriks transformasi yang digunakan berdasarkan sudut *Euler* dan transformasi kecepatan linier.

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2) v_1 \quad (3.19)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi \cos 0 & -\sin\psi \cos 0 + \cos\psi \sin 0 \sin 0 & \sin\psi \sin 0 + \cos\psi \cos 0 \sin 0 \\ \sin\psi \cos 0 & \cos\psi \cos 0 + \sin 0 \sin 0 \sin\psi & -\cos\psi \sin 0 + \sin 0 \sin\psi \cos 0 \\ -\sin 0 & \cos 0 \sin 0 & \cos 0 \cos 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$$

Tugas akhir ini hanya menekankan sudut *heading* kapal atau *yaw* (ψ), sehingga $\theta = \varphi = 0$. Sehingga matriks transformasi menjadi sebuah persamaan yang ditunjukkan oleh persamaan 3.20.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Sistem 2 DOF yang digunakan sebagai kendali manuver kapal menjadikan persamaan kinematik kapal mengalami perubahan dari persamaan 3.20 menjadi persamaan 3.21

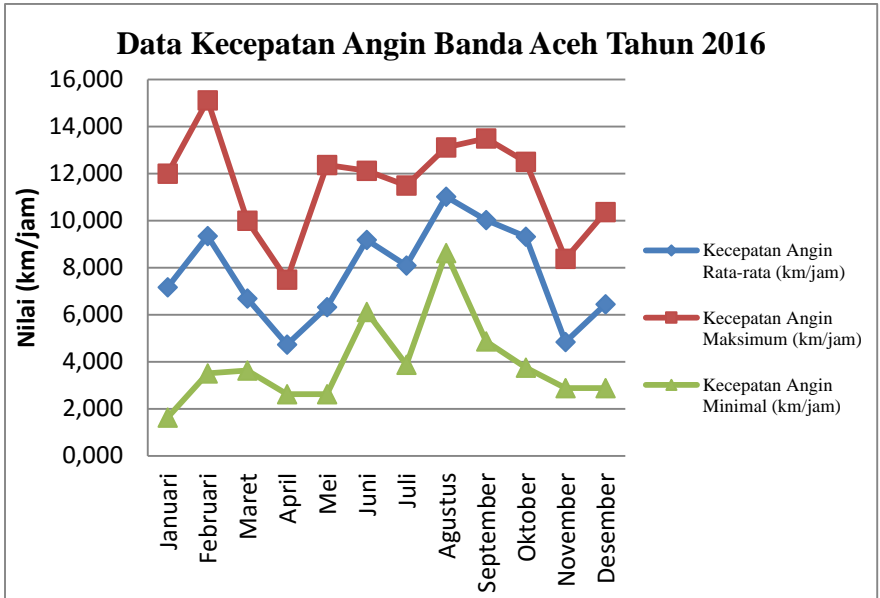
$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

3.5 Pemodelan Beban Angin

Beban angin yang mengenai kapal LNG di Pelabuhan Arun, tepatnya menggunakan data di daerah Banda Aceh tahun 2016 yang ditunjukkan pada Tabel 3.5. Tugas akhir ini menggunakan 3 jenis sudut arah angin (γ_R) yaitu 30° , 40° , dan 50° terhadap sudut *heading* kapal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3

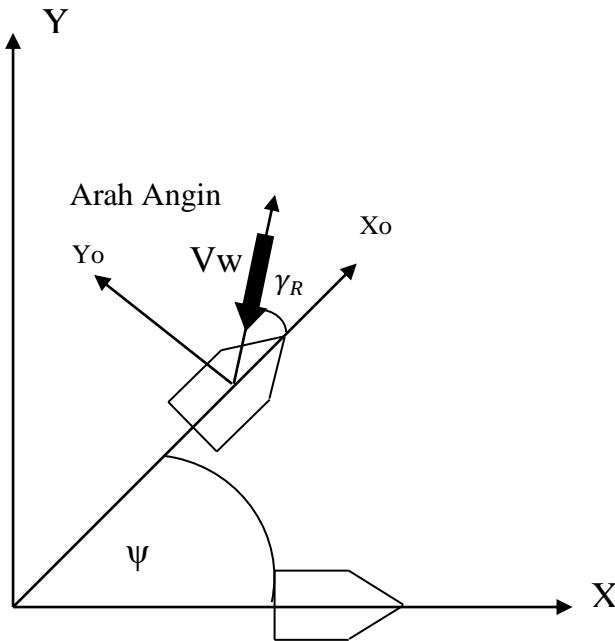
Tabel 3. 5 Data Kecepatan Angin di Banda Aceh tahun 2016
(Anonim)

Bulan (2016)	Kecepatan angin per-bulan (km/jam)		
	maksimum	minimum	rata-rata
Januari	12	1.625	7.167
Februari	15.125	3.5	9.349
Maret	10	3.625	6.694
April	7.5	2.625	4.729
Mei	12.375	2.625	6.323
Juni	12.125	6.125	9.188
Juli	11.5	3.875	8.096
Agustus	13.125	8.625	11.016
September	13.5	4.875	10.033
Oktober	12.5	3.75	9.319
November	8.375	2.875	4.846
Desember	10.375	2.875	6.444



Gambar 3. 3 Data Kecepatan Angin Banda Aceh Tahun 2016

Data angin pada Tabel 3.5 merupakan gangguan lingkungan yang akan mengganggu gerakan kapal pada lintasannya. Gaya dan arah angin yang mengenai kapal dijelaskan pada Gambar 3.4.



Gambar 3. 4 Ilustrasi Gaya Angin terhadap Sudut *Heading* Kapal

Gaya angin ditentukan nilainya dengan menentukan nilai A_i , B_i dan C_i terlebih dahulu sebagai penyusun nilai gaya angin sesuai persamaan, dimana nilainya dapat dilihat pada lampiran C . Maka didapatkan nilai A, B, C pada tabel 3.6.

Tabel 3. 6 Koefisien Gangguan Angin (Fossen, 1994)

Nilai	Sudut Arah Angin		
	30°	40°	50°
A0	1.965	2.333	1.726
A1	-4.810	-5.990	-6.540
A2	0.243	0.247	0.189
A3	-0.154	-0.190	-0.173

Tabel 3.6 (Lanjutan)

Nilai	Sudut Arah Angin		
	30°	40°	50°
A4	0	0	0.348
A5	0	0	0
A6	0.041	0.042	0.048
B0	0.225	0.329	1.164
B1	1.380	1.820	1.260
B2	0	0	0.121
B3	0.023	0.043	0
B4	0	0	-0.242
B5	-0.290	-0.590	-0.950
B6	0	0	0
C0	0.226	0.202	0.176
C1	0.245	0.457	0.573
C2	0	0	0
C3	0	0.007	0.012
C4	0	0	0
C5	-0.380	-0.472	-0.523

Nilai koefisien gaya angin pada tabel 3.6 digunakan untuk menentukan besar nilai gaya angin pada *sway* dan *yaw* sesuai dengan sistem yang hanya menggunakan kendali 2 DOF. Nilai gaya angin ditentukan menggunakan persamaan 2.43 dan 2.44.

Tabel 3. 7 Nilai Gaya dan Momen Angin Pada Tiga Variasi Sudut

Sudut	30	40	50
Cy	0.430565444	0.57171	0.788147
Cn	0.058639288	0.061406	0.059381
Kecepatan Angin 1.5 km/jam			
Yw	3.446E-05	4.66E-05	6.62E-05
Nw	1.134E-06	1.21E-06	1.2E-06

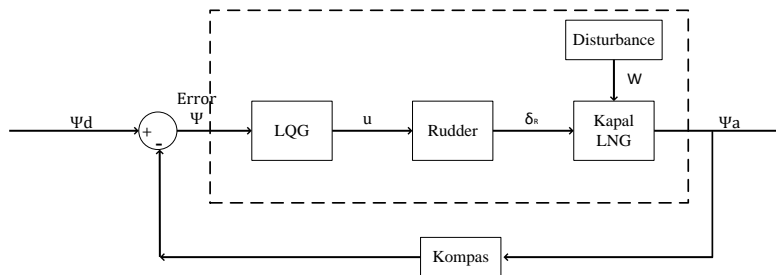
Tabel 3.7 (lanjutan)

Kecepatan Angin 15 km/jam			
Yw	1.17406E-05	1.34E-06	6.08E-06
Nw	3.86364E-07	3.48E-08	1.11E-07

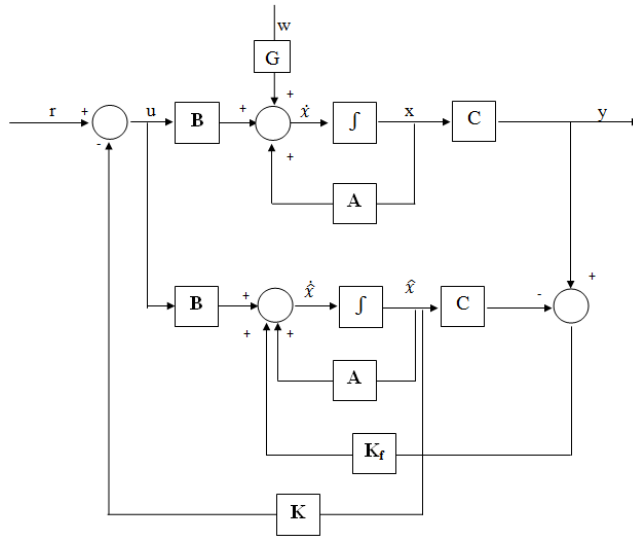
Yw merupakan nilai gaya angin dalam gerak *sway*. Sedangkan Nw merupakan nilai momen angin pada gerak *yaw*.

3.6 Perancangan Sistem *Optimal Tracking Control* Kapal Menggunakan Kendali *Optimal LQG*

Sistem kendali *manuevering* kapal pada umumnya menggunakan masukan berupa nilai *error yaw* yang berasal dari hasil komparasi nilai sudut *yaw* yang diinginkan dengan sudut *yaw* yang dihasilkan sistem. Nilai error sudut *yaw* akan memberikan perintah pada kendali untuk menggerakkan aktuator berupa *rudder* agar sudut *heading* kapal sesuai dengan posisi yang diinginkan berdasarkan titik lintasan kapal. Sistem kendali seperti demikian dapat dijelaskan menggunakan diagram blok Gambar 3.5

**Gambar 3. 5** Diagram Blok Sistem Manuevering kapal LNG

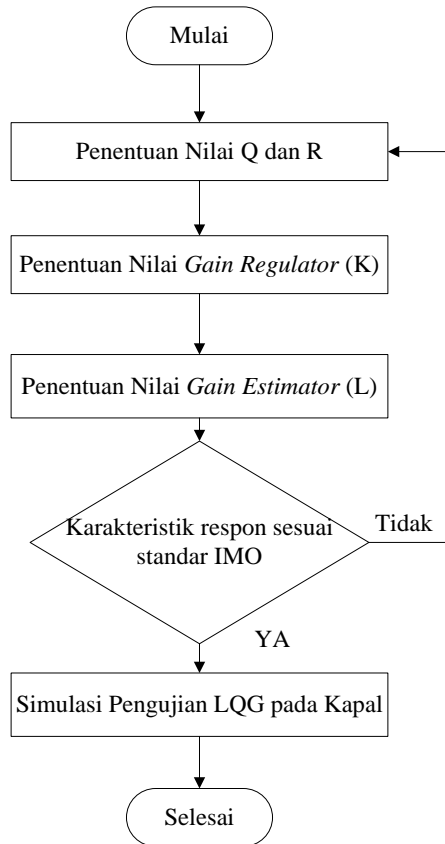
Sistem kendali menggunakan LQG atau *Linear Qudratic Gaussian* diwujudkan dengan menggunakan bentuk persamaan *state-space* pada *plant* yang dikendalikan. Persamaan 2.35 dan 2.42 menjadi dasar me rancang sistem kendali *manuevering* kapal LNG menggunakan metode *Linear Quadratic Gaussian* yang digambarkan dalam blok diagram sistem atau lebih tepatnya disebut *wiring diagram* pada Gambar 3.6



Gambar 3. 6 Blok Diagram sistem LQG (Lewis, Vrabie, & Syrmos, 2012)

Diagram blok sistem LQG pada Gambar 3.6 memiliki beberapa nilai matriks yakni yang disimbolkan dengan huruf A,B,C,dan G. A merupakan matriks keadaan yang memiliki dimensi 3x3. B merupakan matriks kendali yang memiliki dimensi 3x1. C merupakan matriks pengukuran yang berfungsi memilih nilai keadaan yang akan ditampilkan. Matriks C memiliki dimensi 1x3. Nilai-nilai penyusun matriks A dan B didapatkan dari perhitungan pada subbab 3.3 untuk kondisi kapal LNG kosong dan beban penuh. Sedangkan G merupakan matriks gangguan pada sistem atau biasa disebut *process disturbances*.

Perancangan sistem kendali LQG (*Linear Quadratic Gaussian*) ditunjukkan oleh Gambar 3.6. LQG terdiri atas 2 nilai gain yaitu gain *regulator* dan *estimator*. Kedua nilai gain ini dapat ditentukan dengan menggunakan *function* dalam MATLAB R2009a dengan nilai Q dan R sesuai dengan aturan Bryson pada persamaan 2.39 dan 2.40



Gambar 3. 7 Diagram Alir Pembuatan LQG

Gambar 3.7 merupakan prosedur yang dilakukan dalam merancang kendali LQG. Penjelasan dalam setiap langkah dapat dijelaskan sebagai berikut :

a. Penentuan Nilai Q dan R

Nilai Q dan R yang digunakan dilakukan dengan 2 kondisi kapal LNG yang berbeda yakni pada kondisi kapal tanpa ada gangguan dan dengan adanya gangguan angin. Kapal LNG tanpa adanya gangguan angin memiliki nilai Q dan R dengan

menggunakan persamaan 2.39 dan 2.40. Nilai Q dan R yang telah didapat (lihat Lampiran B) kemudian digunakan untuk menentukan nilai gain K dan L yang akan dijelaskan pada subbab 4.4. Kapal LNG dengan adanya gangguan angin memiliki nilai *gain K* yang sama dengan kondisi kapal tanpa adanya gangguan. Perbedaan terjadi pada saat penentuan nilai gain estimator (L), karena nilai Q yang digunakan adalah nilai *noise covariance* yang disebabkan nilai gaya angin yang dikenakan pada kapal LNG. (Lampiran B)

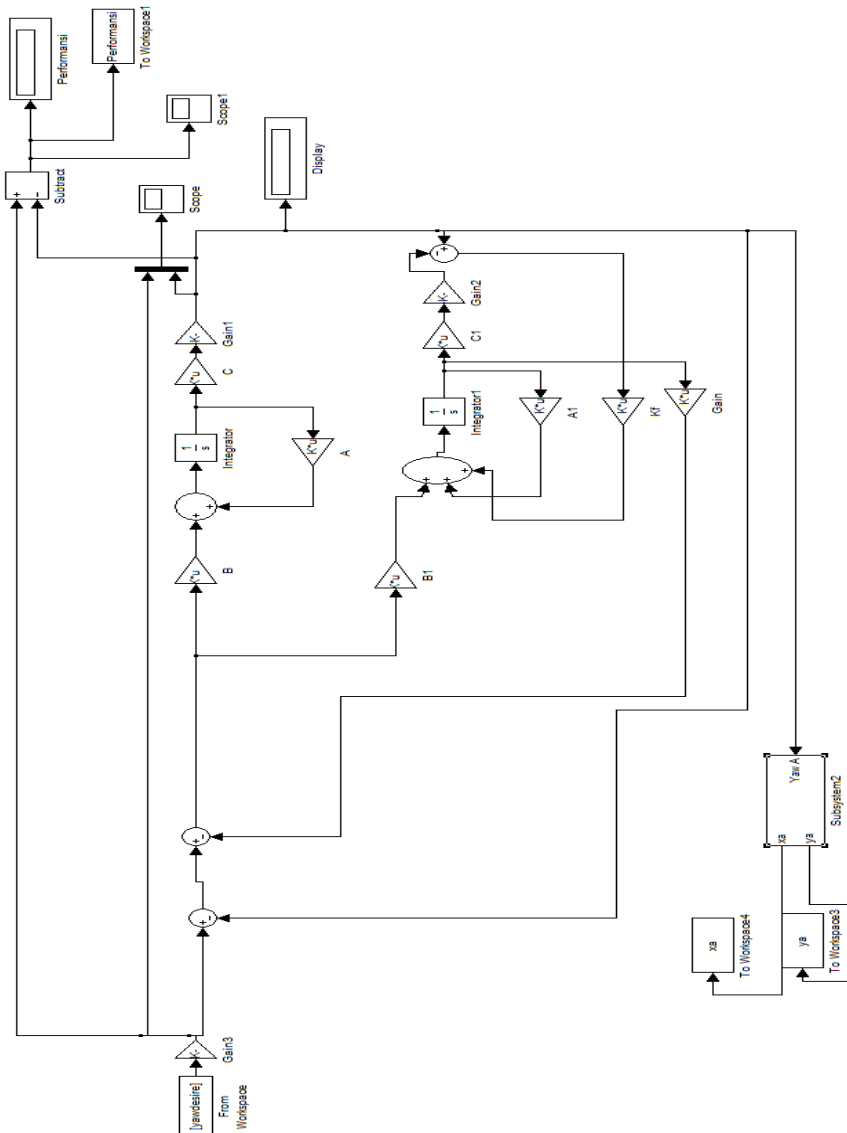
b. Penentuan Nilai Gain Regulator (K) dan estimator (L)

Nilai gain K dan L juga memiliki nilai yang berbeda pada kondisi kapal tanpa gangguan dan dengan adanya gangguan angin. Nilai K dan L ditentukan menggunakan *function* di MATLAB R2009a yang akan dijelaskan pada subbab 4.4.

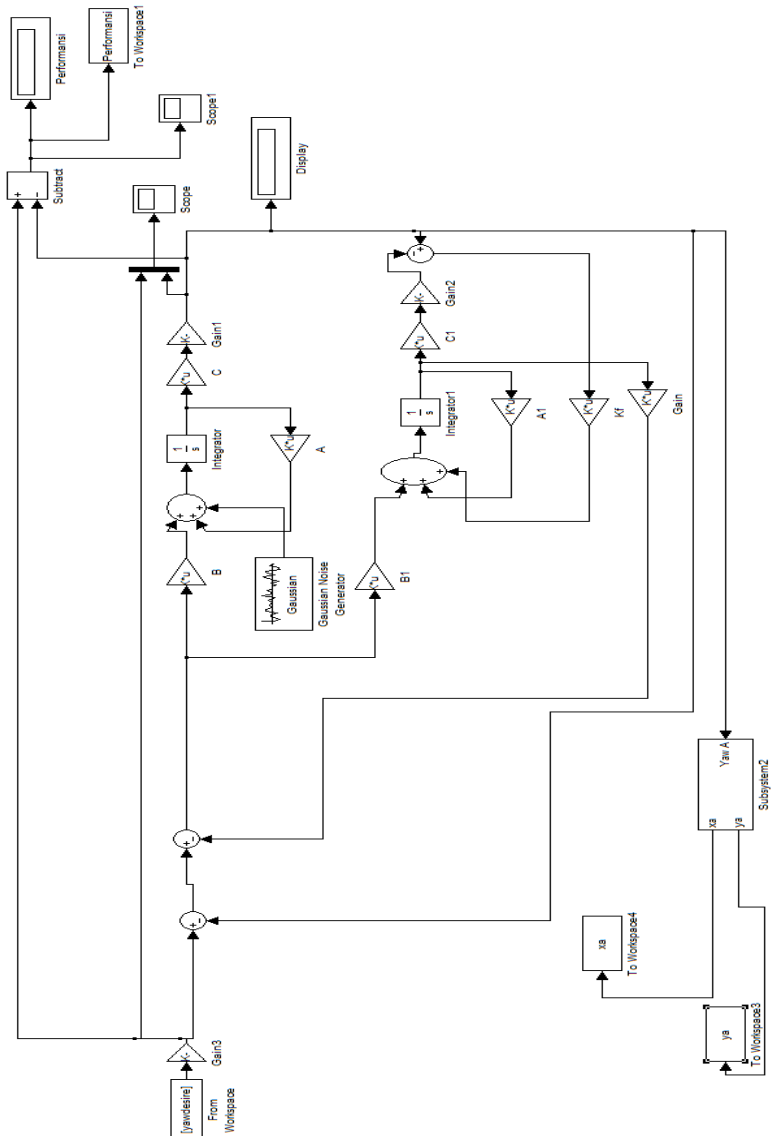
c. Karakteristik Respon

Nilai K dan L yang digunakan pada simulasi lintasan kapal harus memenuhi karakteristik respon sistem *close-loop*. Sistem *close-loop* digunakan untuk menghasilkan respon sistem yang memiliki karakteristik sesuai dengan standar IMO pada tabel 2.3.

Ketika nilai gain estimator dan regulator telah didapatkan, kemudian kedua nilai gain tersebut digunakan dalam simulasi menggunakan *simulink* pada MATLAB seperti pada Gambar 3.5



Gambar 3. 8 Simulink trayektori Kapal LNG tanpa gangguan angin dengan Kendali LQG



3.7 Pengujian Sistem *Optimal Tracking Control*

Pengujian sistem *optimal tracking control* kapal LNG Tangguh Towuti dilakukan dengan membandingkan lintasan kapal hasil kendali dengan lintasan sesuai dengan data yang dimiliki oleh Pelabuhan Arun. Pengujian dilakukan dengan cara simulasi menggunakan *software* MATLAB R2009a.

3.8 Penutup

Nilai *error* yang dihasilkan dari perbandingan lintasan kapal hasil kendali dengan lintasan sesuai dengan data yang dimiliki oleh Pelabuhan Arun akan didapatkan suatu kesimpulan yang menjadi suatu parameter ketercapaian tujuan dari tugas akhir ini. Kemudian dilakukan penyusunan laporan tugas akhir sesuai dengan panduan tugas akhir.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Uji Kestabilan Sistem

Uji kestabilan sistem dilakukan dengan cara mendapatkan nilai akar-akar karakteristik sistem. Kendali LQG diaplikasikan dengan menggunakan sistem dalam bentuk ruang keadaan atau *state-space*. Sehingga untuk mendapatkan nilai akar-akar karakteristik tidak dapat menggunakan *rootlocus* seperti pada fungsi alih sistem, namun dengan menggunakan persamaan (4.1).

$$|sI - A| = 0 \quad (4.1)$$

Persamaan 4.1 digunakan untuk menentukan nilai *eigenvalue* dari persamaan *state-space* yang telah didapat. Nilai *eigenvalue* merepresentasikan nilai akar-akar karakteristik sistem yang umum digunakan dalam persamaan fungsi transfer. Nilai *eigenvalue* yang berada pada sebelah kiri sumbu imajiner atau memiliki nilai sumbu x negatif maka sistem dikatakan stabil.

a. Kapal LNG tanpa beban

Nilai *eigenvalue* pada kapal LNG kosong (tanpa beban tambahan) merupakan akar-akar persamaan determinan pada persamaan 4.1. Nilai matriks A pada kapal LNG kosong menggunakan persamaan 3.6.

$$|sI - A| = 0$$

$$|s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0.01330599 & 4.61231646 & 0 \\ -0.00134861 & -0.14747042 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}| = 0$$

$$| \begin{bmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0.01330599 & 4.61231646 & 0 \\ -0.00134861 & -0.14747042 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} | = 0$$

$$| \begin{bmatrix} s + 0.01330599 & -4.61231646 & 0 \\ 0.00134861 & s + 0.14747042 & 0 \\ 0 & 1 & s \end{bmatrix} | = 0 \quad (4.2)$$

Nilai *eigenvalue* didapatkan dari nilai determinan matriks (4.2). Nilai-nilai *eigenvalue* sistem kapal LNG kosong yaitu :
 $S_1 = 0$

$$S_2 = -0.0804 + 0.0415i$$

$$S_3 = -0.0804 - 0.0415i$$

Nilai akar-akar karakteristik sistem bernilai negatif, sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem stabil.

b. Kapal LNG dengan beban penuh (DWT)

Nilai *eigenvalue* pada kapal LNG beban penuh merupakan akar-akar persamaan determinan pada persamaan 4.1. Nilai matriks A pada kapal LNG beban penuh menggunakan persamaan 3.15.

$$|sI - A'| = 0$$

$$|s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0.01411645 & 3.42838426 & 0 \\ -0.00114573 & -0.12005159 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}| = 0$$

$$| \begin{bmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0.01411645 & 3.42838426 & 0 \\ -0.00114573 & -0.12005159 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} | = 0$$

$$| \begin{bmatrix} s + 0.01411645 & -3.42838426 & 0 \\ 0.00114573 & s + 0.12005159 & 0 \\ 0 & 1 & s \end{bmatrix} | = 0 \quad (4.3)$$

Nilai *eigenvalue* didapatkan dari nilai determinan matriks (4.3). Nilai-nilai *eigenvalue* sistem kapal LNG beban penuh yaitu :

$$S_1 = 0$$

$$S_2 = -0.0671 + 0.0335i$$

$$S_3 = -0.0671 - 0.0335i$$

Nilai akar-akar karakteristik sistem bernilai negatif, sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem stabil.

4.2 Uji Keterkendalian (*Controllability*)

Suatu sistem didefinisikan terkendali, jika perubahan keadaan 1 (x_1) ke keadaan selanjutnya (x_2) dapat ditentukan waktunya. Dalam mengetahui keterkendalian suatu sistem maka

dihitung dari nilai “ Determinan matriks keterkendalian (M_c) “. Matriks keterkendalian didapatkan dengan menggunakan *function* “Ctrb” pada MATLAB. Jika nilai dari $\det | M_c |$ tidak sama dengan nol.

a. Kapal LNG kosong

Nilai matriks keterkendalian didapatkan menggunakan *function* pada MATLAB yakni *ctrb(A,B)*. Matriks keterkendalian pada kapal LNG kosong yang didapatkan memiliki nilai yang ditunjukkan pada persamaan 4.4.

$$M_c = \begin{bmatrix} 0.1185 & -0.0036 & -0.0004 \\ -0.0004 & -0.0001 & 0 \\ 0 & -0.0004 & -0.0001 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\text{Determinan } (M_c) = 2.1178 \times 10^{-9}$$

Nilai dari $\det | M_c |$ tidak sama dengan nol, maka sistem terkendali.

b. Kapal LNG dengan beban penuh (DWT)

Matriks keterkendalian pada kapal LNG beban penuh yang didapatkan dari *function* “ctrb” menggunakan MATLAB memiliki nilai yang ditunjukkan pada persamaan 4.5.

$$M_c = \begin{bmatrix} 0.0897 & -0.0031 & -0.0001 \\ -0.0005 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0005 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\text{Determinan } (M_c) = 5.7108 \times 10^{-10}$$

Nilai dari $\det | M_c |$ tidak sama dengan nol, maka sistem terkendali.

4.3 Uji Keteramatan (*Observability*)

Suatu sistem didefinisikan teramat, jika perubahan keadaan 1 (x_1) ke keadaan selanjutnya (x_2) dapat diamati. Dalam mengetahui keteramatan suatu sistem maka dihitung dari nilai “ Determinan matriks keteramatan (M_o) “. Matriks keteramatan didapatkan dengan menggunakan *function* “obsv” pada MATLAB. Jika nilai dari $\det | M_c |$ tidak sama dengan nol.

a. Kapal LNG kosong

Nilai matriks keteramatan didapatkan menggunakan *function* pada MATLAB yakni *obsv(A,C)*. Matriks keteramatan pada kapal LNG kosong ditunjukkan oleh persamaan 4.6

$$M_o = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -0.0013 & -0.1475 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Determinan (M_o) = 0.0013

Nilai dari $\det | M_o |$ tidak sama dengan nol, maka sistem terkendali.

b. Kapal LNG dengan beban penuh (DWT)

Nilai matriks keteramatan didapatkan menggunakan *function* pada MATLAB yakni *obsv(A,C)*. Matriks keteramatan pada kapal LNG beban penuh ditunjukkan oleh persamaan 4.7

$$M_o = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -0.0011 & -0.1201 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Determinan (M_o) = 0.0011

Nilai dari $\det | M_o |$ tidak sama dengan nol, maka sistem terkendali.

4.4 Perancangan Kendali LQG

Sistem kendali LQG dirancang dengan menggunakan nilai Q dan R yang memiliki performansi minimum. Penentuan nilai Q dan R dapat menggunakan Aturan Bryson (*Bryson's Rule*) (Bryson & Ho, 1975) yang dinyatakan pada persamaan 2.37 dan 2.38.

Nilai Q dan R pada masing-masing kondisi (*state*) maka akan didapatkan nilai gain regulator (K) dan estimator (L). Kedua *gain* tersebut akan dimasukkan dalam sistem tertutup (*close-loop*) untuk mengetahui performansi sistem yang dinyatakan dalam *error* sistem. Nilai *error* minimum menunjukkan bahwa sistem optimal. (Eide, 2011)

Nilai matriks Q yang memiliki *error* minimum pada saat dilakukan uji *close-loop* dinyatakan pada persamaan 4.8 (*error* uji *close-loop* lihat Lampiran B) :

$$Q = \begin{bmatrix} 16.6626 & 0 & 0 \\ 0 & 3.2048 & 0 \\ 0 & 0 & 1.6211 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Nilai R yang digunakan tidak berupa matriks melainkan suatu konstanta. Kendali LQG yang dirancang menggunakan nilai R sama dengan 1.

Sistem gerak kapal LNG tanpa ada gangguan memiliki nilai gain regulator (K) yang didapatkan dengan menggunakan function “lqr” yang menghasilkan nilai K dan masing-masing performansi sistem yang dihasilkan (dilihat dalam Lampiran B). Nilai K yang digunakan untuk mendapat performansi terbaik dengan nilai *error* minimum yaitu

$$K = [3.8759 \quad 18.3145 \quad -1.2732]$$

Setelah nilai gain K didapatkan, kemudian dilakukan uji kestabilan sistem dengan adanya penambahan *gain state feedback* atau gain regulator (K). Uji kestabilan dilakukan seperti pada subbab 3.1. namun terdapat perbedaan pada persamaan determinan matriks yang digunakan pada persamaan 2.30, sehingga persamaan determinan kestabilan sistem yakni sebagai berikut :

- Kapal LNG Tanpa Beban Tambahan

$$\begin{aligned} & |sI - (A - BK)| = 0 \\ & s \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \\ & - \begin{vmatrix} -0.47265095 & 2.44180811 & 0.15089089 \\ 0.00037709 & -0.13931607 & -0.00056688 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 0 \\ & \left| \begin{vmatrix} s + 0.47265095 & -2.44180811 & -0.15089089 \\ -0.00037709 & s + 0.13931607 & 0.00056688 \\ 0 & -1 & s \end{vmatrix} \right| = 0 \end{aligned}$$

Kemudian didapatkan nilai-nilai *eigenvalue* sistem kapal LNG kosong setelah ditambahkan gain K yaitu :

$$S_1 = -0.0033$$

$$S_2 = -0.1336$$

$$S_3 = -0.4750$$

- Kapal LNG Beban Penuh (Dwt)

$$|sI - (A - BK)| = 0$$

$$s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0.36180732 & 1.78546665 & 0.11421348 \\ 0.00088392 & -0.12964216 & -0.00066672 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = 0$$

$$\left| \begin{bmatrix} s + 0.36180732 & -1.78546665 & -0.11421348 \\ -0.00088392 & s + 0.12964216 & 0.00066672 \\ 0 & -1 & s \end{bmatrix} \right| = 0$$

Nilai-nilai *eigenvalue* sistem kapal LNG beban penuh setelah ditambahkan gain K yaitu :

$$S_1 = -0.0032$$

$$S_2 = -0.1210$$

$$S_3 = -0.3673$$

Jika dibandingkan dengan nilai *eigenvalue* pada subbab 3.1, nilai *eigenvalue* setelah ditambahkan gain state feedback K memiliki nilai lebih kecil atau bernilai (-) dan terletak lebih ke kiri sumbu Y. Hal ini menyatakan bahwa sistem setelah diberikan gain K lebih stabil dibandingkan sebelum diberikan gain K.

Nilai gain estimator L didapatkan dengan cara menentukan nilai $a = \text{eig}(A - B \cdot K)$, kemudian di *transpose* menjadi a' , gain estimator menggunakan *command* $L = \text{place}(A', C', a')$, sehingga didapatkan nilai L

$$L = [2.4308 ; -0.0152 ; 0.4512]$$

Sistem yang memiliki gangguan lingkungan seperti gangguan beban angin terdapat perbedaan pada penentuan nilai

gain estimator. Nilai *gain* estimator ditentukan menggunakan *function* “kalman” pada MATLAB. *Function* ini dapat digunakan jika terdapat nilai *covariance* dari matriks gangguan lingkungan pada sistem. Setiap nilai *L* berbeda untuk nilai variasi gangguan angin yang berbeda pula. Nilai matriks *L* untuk setiap gangguan angin yang didapatkan memiliki nilai yaitu (*Syntax* dapat dilihat pada Lampiran B)

- Kecepatan Angin 1.5 km/jam dan sudut arah angin 30°

$$L = [0 ; 0 ; 0.3966E-06]$$
- Kecepatan Angin 1.5 km/jam dan sudut arah angin 40°

$$L = [0 ; 0 ; 0.5378E-06]$$
- Kecepatan Angin 1.5 km/jam dan sudut arah angin 50°

$$L = [0 ; 0 ; 0.7671E-06]$$
- Kecepatan Angin 15 km/jam dan sudut arah angin 30°

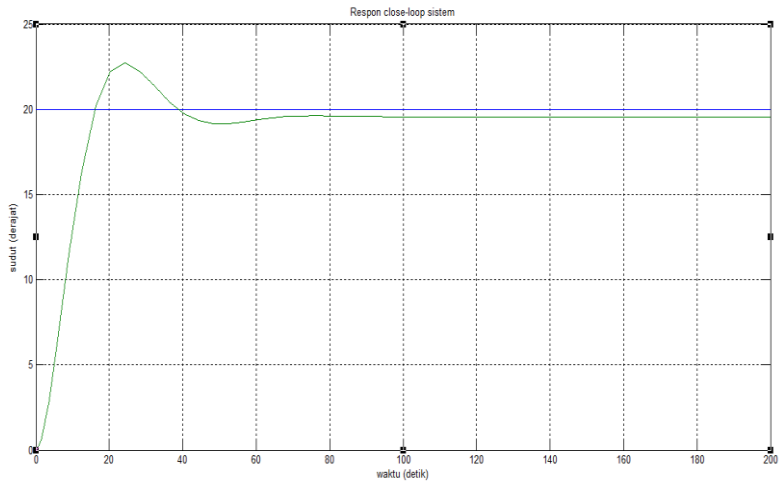
$$L = [0 ; 0 ; 0.1351E-06]$$
- Kecepatan Angin 15 km/jam dan sudut arah angin 40°

$$L = [0 ; 0 ; 0.1518E-07]$$
- Kecepatan Angin 15 km/jam dan sudut arah angin 50°

$$L = [0 ; 0 ; 0.7047E-07]$$

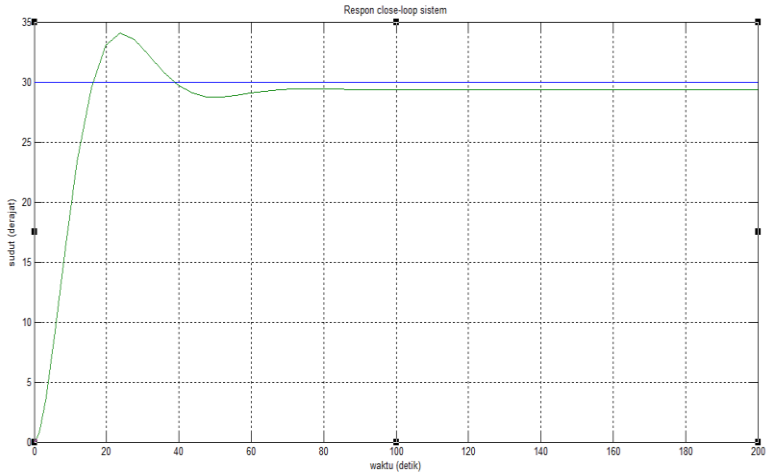
4.5 Uji *Close-Loop* respon sistem

Uji *close-loop* dilakukan dengan memberikan sistem kontrol berupa LQG (*Linear Quadratic Gaussian*) dalam bentuk sistem ruang keadaan (*state space*).



Gambar 4. 1 Respon *Close Loop* dengan *Input Step Setpoint* 20°

Respon sistem yang ditunjukkan gambar 4.1 dengan diberikan masukan fungsi step dengan nilai *set point* 20° memiliki karakteristik respon sistem sebagai berikut yakni nilai *maximum overshoot* 12,555 % (2,511), nilai *error steady state* 2,17 % (0.43477) dan *settling time* 62,8 detik.



Gambar 4. 2 Respon *Close Loop* dengan *Input Step Setpoint* 30°

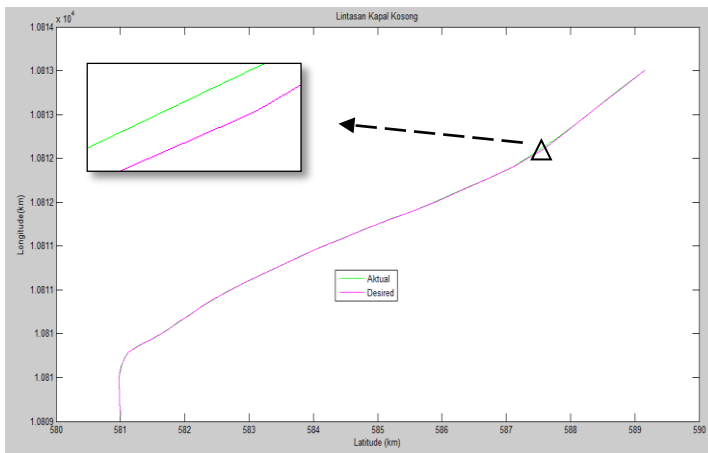
Respon sistem yang ditunjukkan Gambar 4.2 dengan diberikan masukan fungsi step dengan nilai *set point* 30° memiliki karakteristik respon sistem sebagai berikut yakni nilai *maximum overshoot* 12,283 % (3,685), nilai *error steady state* 2,17 % (0.6521) dan *settling time* 83,6 detik.

4.6 Hasil Simulasi *Optimal Tracking Control* Pada Kapal LNG

Simulasi gerak kapal LNG menggunakan *simulink* pada MATLAB yang ditunjukkan pada Gambar 3.7 dan 3.8. Simulasi dilakukan dengan 4 macam model yaitu model kapal LNG kosong, model kapal LNG beban penuh, model kapal LNG kosong dengan gangguan angin dan model kapal LNG beban penuh dengan gangguan angin.

4.7.1 Kapal LNG Kosong

Simulasi pertama yakni pada model dinamika kapal LNG kosong. Simulasi dilakukan dengan memasukkan nilai matriks A,B, dan C kapal LNG tanpa beban yang didapatkan pada subbab 3.3. Selain itu juga digunakan nilai gain regulator K dan estimator L yang memiliki nilai $K = [3.8759 \quad 18.3145 \quad -1.2732]$ dan $L = [2.4308 ; -0.0152 ; 0.4512]$.



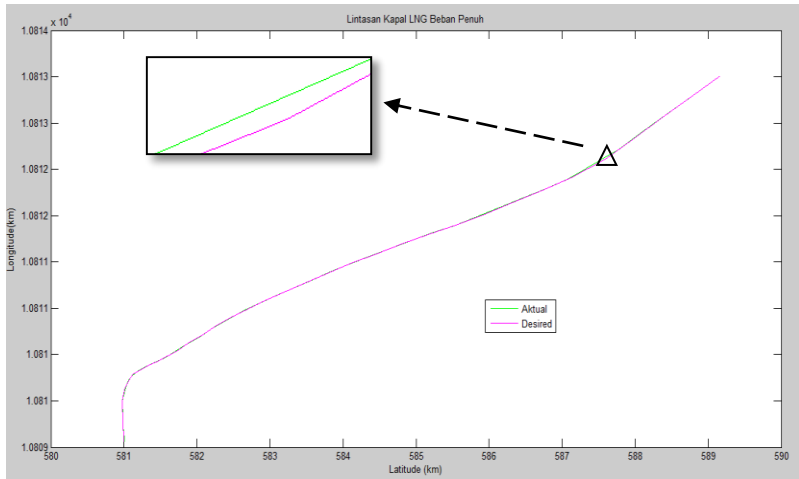
Gambar 4. 3 Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Tanpa Beban

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa lintasan aktual kapal tidak berbeda jauh dari lintasan kapal yang diinginkan sesuai dengan data lintasan di Pelabuhan Arun. Nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu X (*latitude*) adalah 0.1962 km, sedangkan nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu Y (*longitude*) adalah 0.1139 km , kedua nilai tersebut terjadi pada menit ke 37. Nilai rata-rata dari kesalahan (*error*) lintasan untuk sumbu X dan sumbu Y adalah 0.0406 km dan 0.0198 km. Data error lintasan dapat dilihat pada Lampiran D.

4.7.2 Kapal LNG Beban Penuh

Simulasi kedua yakni pada model dinamika kapal LNG kosong. Simulasi dilakukan dengan memasukkan nilai matriks

A,B, dan C kapal LNG beban penuh yang didapatkan pada subbab 3.3. Selain itu juga digunakan nilai gain regulator K dan estimator L yang memiliki nilai $K = [3.8759 \quad 18.3145 \quad -1.2732]$ dan $L = [2.4308 ; -0.0152 ; 0.4512]$.



Gambar 4. 4 Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Beban Penuh

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa lintasan aktual kapal tidak berbeda jauh dari lintasan kapal yang diinginkan sesuai dengan data lintasan di Pelabuhan Arun. Nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu X (*latitude*) adalah 0.1931 km , sedangkan nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu Y (*longitude*) adalah 0.1121 km , kedua nilai tersebut terjadi pada menit ke 37. Nilai rata-rata dari kesalahan (*error*) lintasan untuk sumbu X dan sumbu Y adalah 0.0404 km dan 0.0202 km . Data error lintasan dapat dilihat pada Lampiran D.

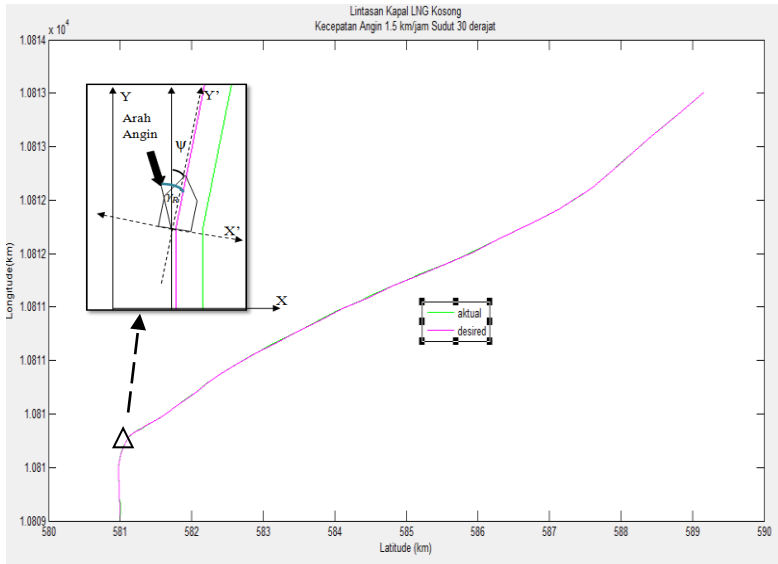
Nilai *error* lintasan yang dihasilkan pada saat kapal LNG memiliki beban tambahan penuh atau DWT (*Deadweight ton*) tidak berbeda jauh atau hampir sama dengan *error* lintasan pada saat kapal tidak bermuatan. Hal ini dapat dilihat dari kedua nilai *error* yang dihasilkan dari kedua kapal dan memiliki nilai *error* maksimal pada waktu yang sama.

4.7.3 Kapal LNG Tanpa Beban dengan Gangguan Angin

Nilai gangguan angin yang dikenakan pada gerak kapal memiliki kecepatan 1.5 km/jam dan 15 km/jam sesuai dengan data rata-rata kecepatan angin di Pelanuhan Arun. Sedangkan variasi sudut yang digunakan adalah 30°, 40°, dan 50°. Simulasi dilakukan dengan memasukkan nilai matriks A,B, dan C kapal LNG tanpa beban yang didapatkan pada subbab 3.3. Selain itu dimasukkan pula matriks G yang didapat pada subbab 3.4.

Berdasarkan simulasi yang digunakan menggunakan *software* MATLAB didapatkan hasil lintasan sebagai berikut :

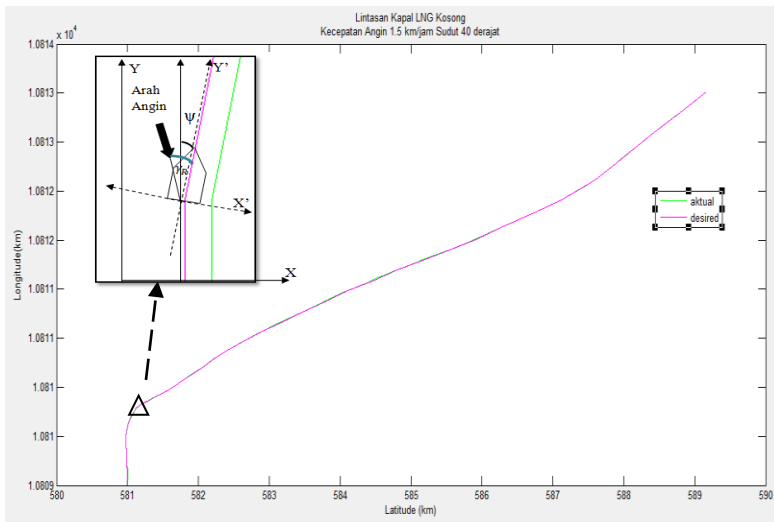
- Kecepatan angin 1.5 km/jam dengan sudut 30 derajat
Pada simulasi dengan adanya beban gangguan angin nilai matriks A,B,C yang digunakan pada blok sistem sama dengan matriks yang digunakan pada simulasi tanpa ada gangguan angin. Namun nilai *gain* estimator yang digunakan berbeda. Nilai *gain* regulator K dan estimator L yang digunakan adalah $K = [3.8759 \quad 18.3145 \quad -1.2732]$ dan $L = [0 ; 0 ; 0.3966E-06]$



Gambar 4. 5 Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Tanpa Beban Dengan Gangguan Angin 1.5 km/jam dengan sudut 30 derajat

Nilai kesalahan (*error*) maksimal pada gambar 4.5 untuk sumbu X (*latitude*) adalah 0.001028 km , sedangkan nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu Y (*longitude*) adalah 0.001028km. Sedangkan nilai rata-rata dari kesalahan (*error*) lintasan untuk sumbu X dan sumbu Y adalah 0.00081 km dan 0.00044 km .

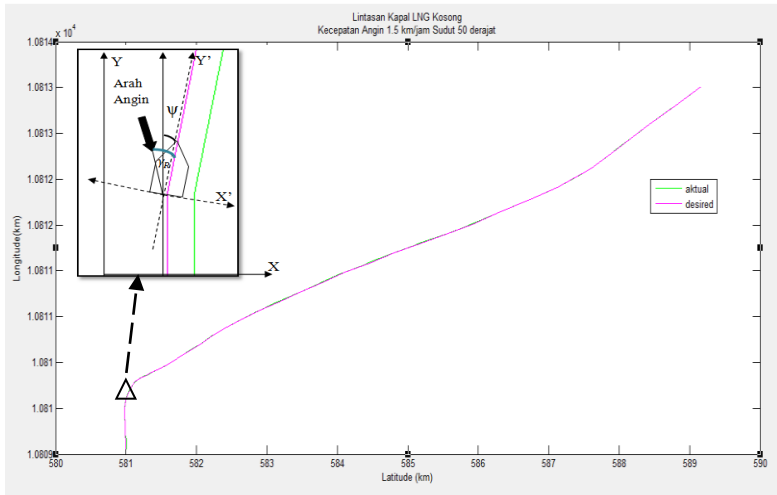
- Kecepatan angin 1.5 km/jam dengan sudut 40 derajat
 Nilai *gain* regulator K dan estimator L yang digunakan adalah $K = \begin{bmatrix} 3.8759 & 18.3145 & -1.2732 \end{bmatrix}$ $L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.5378-06 \end{bmatrix}$



Gambar 4. 6 Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Tanpa Beban Dengan Gangguan Angin 1.5 km/jam dengan sudut 40 derajat

Nilai kesalahan (*error*) maksimal pada gambar 4.6 untuk sumbu X (*lattitude*) adalah 0.001028 km , sedangkan nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu Y (*longitude*) adalah 0.001028km. Sedangkan nilai rata-rata dari kesalahan (*error*) lintasan untuk sumbu X dan sumbu Y adalah 0.00081 km dan 0.00044 km .

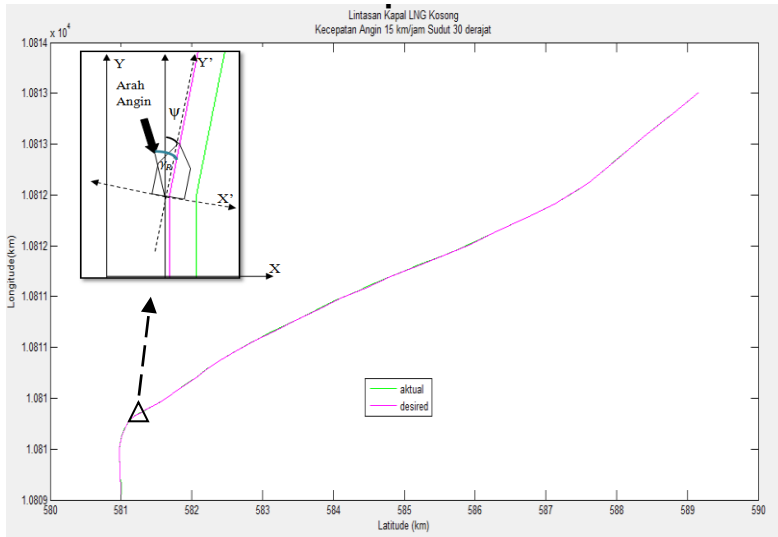
- Kecepatan angin 1.5 km/jam dengan sudut 50 derajat
 Nilai *gain* regulator K dan estimator L yang digunakan adalah $K = \begin{bmatrix} 3.8759 & 18.3145 & -1.2732 \end{bmatrix}$ $L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.7671E-06 \end{bmatrix}$



Gambar 4. 7 Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Tanpa Beban Dengan Gangguan Angin 1.5 km/jam dengan sudut 50 derajat

Nilai kesalahan (*error*) maksimal pada gambar 4.7 untuk sumbu X (*latitude*) adalah 0.001028 km , sedangkan nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu Y (*longitude*) adalah 0.001028km. Sedangkan nilai rata-rata dari kesalahan (*error*) lintasan untuk sumbu X dan sumbu Y adalah 0.00081 km dan 0.00044 km .

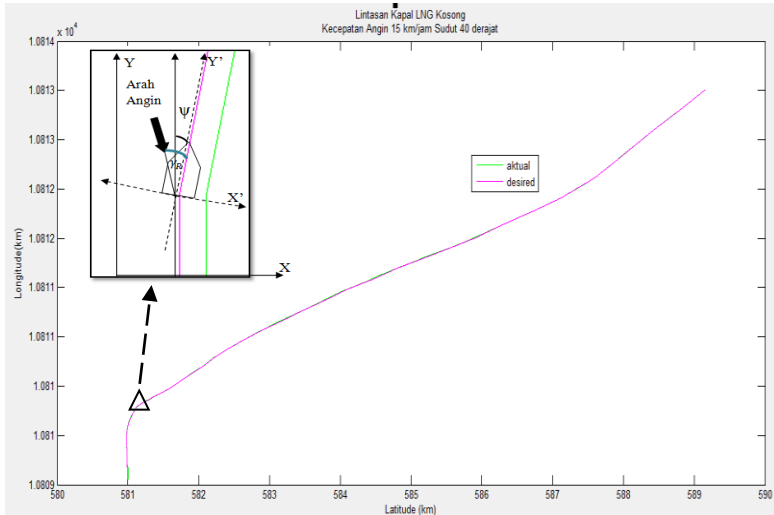
- Kecepatan angin 15 km/jam dengan sudut 30 derajat
 Nilai *gain* regulator K dan estimator L yang digunakan adalah $K = \begin{bmatrix} 3.8759 & 18.3145 & -1.2732 \end{bmatrix}$ dan $L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.1351E-06 \end{bmatrix}$



Gambar 4. 8 Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Tanpa Beban Dengan Gangguan Angin 15 km/jam dengan sudut 30 derajat

Nilai kesalahan (*error*) maksimal pada gambar 4.8 untuk sumbu X (*latitude*) adalah 0.001028 km , sedangkan nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu Y (*longitude*) adalah 0.001028km. Sedangkan nilai rata-rata dari kesalahan (*error*) lintasan untuk sumbu X dan sumbu Y adalah 0.00081 km dan 0.00044 km .

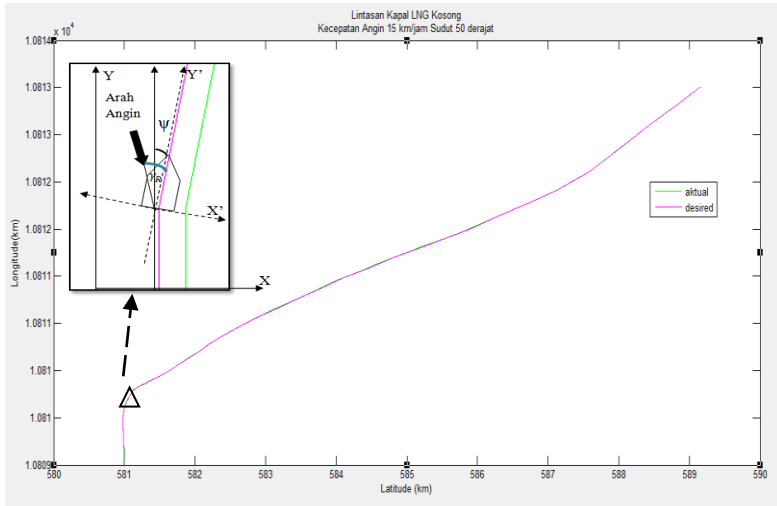
- Kecepatan angin 15 km/jam dengan sudut 40 derajat
 Nilai *gain* regulator K dan estimator L yang digunakan adalah $K = [3.8759 \quad 18.3145 \quad -1.2732]$ dan $L = [0 ; 0 ; 0.1518E-07]$



Gambar 4. 9 Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Tanpa Beban Dengan Gangguan Angin 15 km/jam Dengan Sudut 40 Derajat

Nilai kesalahan (*error*) maksimal pada gambar 4.9 untuk sumbu X (*latitude*) adalah 0.001028 km , sedangkan nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu Y (*longitude*) adalah 0.001028km. Sedangkan nilai rata-rata dari kesalahan (*error*) lintasan untuk sumbu X dan sumbu Y adalah 0.00081 km dan 0.00044 km .

- Kecepatan angin 15 km/jam dengan sudut 50 derajat
 Nilai *gain* regulator K dan estimator L yang digunakan adalah $K = [3.8759 \quad 18.3145 \quad -1.2732]$ dan $L = [0 ; 0 ; 0.7047E-07]$



Gambar 4. 10 Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Tanpa Beban Dengan Gangguan Angin 15 km/jam dengan sudut 50 derajat

Gambar 4.5 hingga Gambar 4.10 menunjukkan bahwa lintasan aktual kapal ketika diberikan gangguan angin tidak berbeda jauh dari lintasan kapal yang diinginkan sesuai dengan data lintasan di Pelabuhan Arun. Ketika kapal diberikan gangguan beban angin dengan kecepatan 1.5 km/jam dan 15 km/jam pada sudut yang bervariasi yaitu 30° , 40° , dan 50° menghasilkan lintasan yang sama dan nilai kesalahan (*error*) yang sama. Nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu X (*latitude*) adalah 0.001028 km, sedangkan nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu Y (*longitude*) adalah 0.001028 km. Sedangkan nilai rata-rata dari kesalahan (*error*) lintasan untuk sumbu X dan sumbu Y adalah 0.00081 km dan 0.00044 km. Data lintasan dapat dilihat pada Lampiran D.

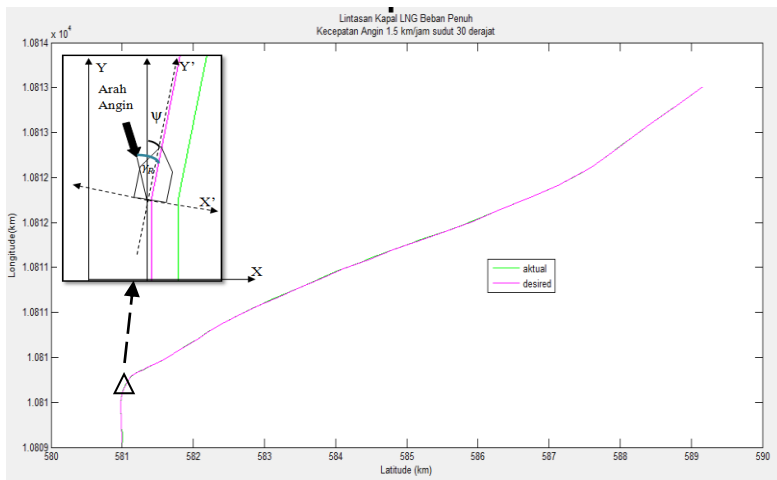
4.7.4 Kapal LNG Beban Penuh dengan Gangguan Angin

Nilai gangguan angin yang dikenakan pada gerak kapal memiliki kecepatan 1.5 km/jam dan 15 km/jam sesuai dengan

data rata-rata kecepatan angin di Pelanuhan Arun. Sedangkan variasi sudut yang digunakan adalah 30° , 40° , dan 50° . Simulasi dilakukan dengan memasukkan nilai matriks A,B, dan C kapal LNG tanpa beban yang didapatkan pada subbab 3.3. Selain itu dimasukkan pula matriks G yang didapat pada subbab 3.5.

Dari simulasi yang digunakan menggunakan software MATLAB didapatkan hasil lintasan sebagai berikut :

- Kecepatan angin 1.5 km/jam dengan sudut 30 derajat
 Simulasi dengan adanya beban gangguan angin nilai matriks A,B,C yang digunakan pada blok sistem sama dengan matriks yang digunakan pada simulasi tanpa ada gangguan angin. Namun nilai *gain* estimator yang digunakan berbeda. Nilai *gain* regulator K dan estimator L yang digunakan adalah $K = \begin{bmatrix} 3.8759 & 18.3145 & -1.2732 \end{bmatrix}$ dan $L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.2108E-06 \end{bmatrix}$.

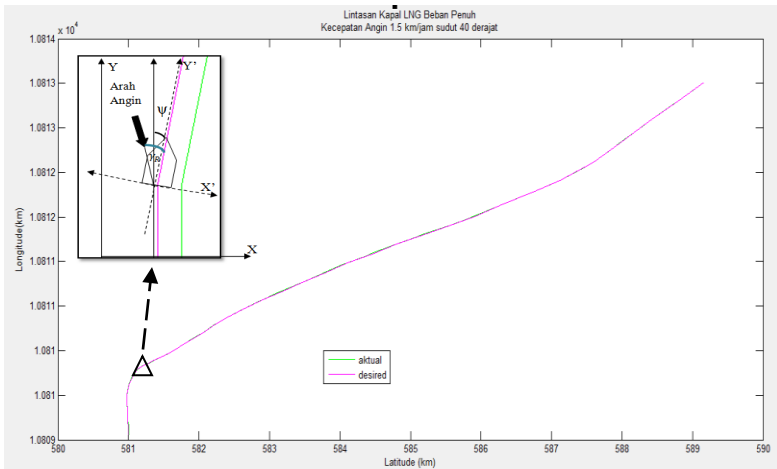


Gambar 4. 11 Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Beban Penuh Dengan Gangguan Angin 1.5 km/jam dengan sudut 30 derajat

Nilai kesalahan (*error*) maksimal pada gambar 4.11 untuk sumbu X (*latitude*) adalah 0.001028 km , sedangkan nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu Y (*longitude*) adalah

0.001028km. Sedangkan nilai rata-rata dari kesalahan (*error*) lintasan untuk sumbu X dan sumbu Y adalah 0.00082 km dan 0.00043 km .

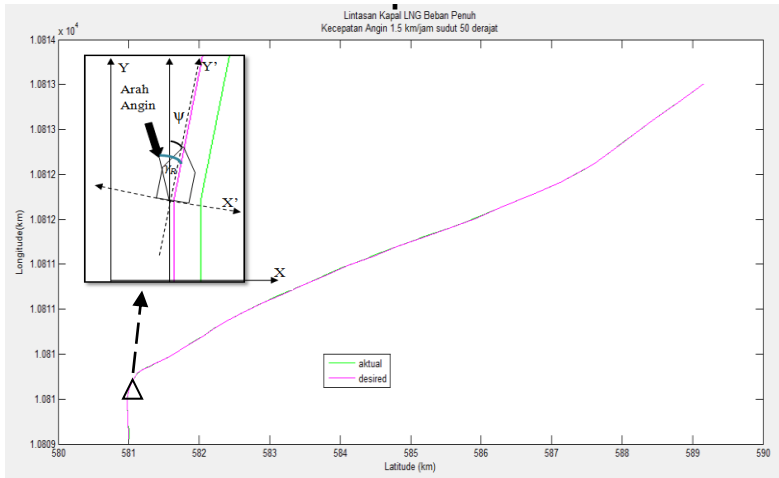
- Kecepatan angin 1.5 km/jam dengan sudut 40 derajat
 Nilai *gain* regulator K dan estimator L yang digunakan adalah $K = [3.8759 \quad 18.3145 \quad -1.2732]$ dan $L = [0 ; 0 ; 0.1732-06]$



Gambar 4. 12 Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Beban Penuh Dengan Gangguan Angin 1.5 km/jam dengan sudut 40 derajat

Nilai kesalahan (*error*) maksimal pada gambar 4.12 untuk sumbu X (*latitude*) adalah 0.001028 km , sedangkan nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu Y (*longitude*) adalah 0.001028km. Sedangkan nilai rata-rata dari kesalahan (*error*) lintasan untuk sumbu X dan sumbu Y adalah 0.00082 km dan 0.00043 km .

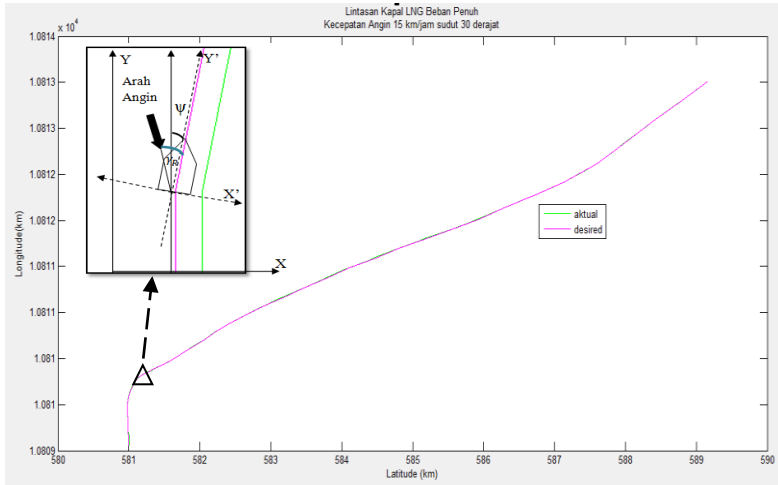
- Kecepatan angin 1.5 km/jam dengan sudut 50 derajat
 Nilai *gain* regulator K dan estimator L yang digunakan adalah $K = \begin{bmatrix} 3.8759 & 18.3145 & -1.2732 \end{bmatrix}$ dan $L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.2750E-06 \end{bmatrix}$.



Gambar 4. 13 Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Beban Penuh Dengan Gangguan Angin 1.5 km/jam dengan sudut 50 derajat

Nilai kesalahan (*error*) maksimal pada gambar 4.13 untuk sumbu X (*latitude*) adalah 0.001028 km , sedangkan nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu Y (*longitude*) adalah 0.001028km. Sedangkan nilai rata-rata dari kesalahan (*error*) lintasan untuk sumbu X dan sumbu Y adalah 0.00082 km dan 0.00043 km .

- Kecepatan angin 15 km/jam dengan sudut 30 derajat
 Nilai *gain* regulator K dan estimator L yang digunakan adalah $K = \begin{bmatrix} 3.8759 & 18.3145 & -1.2732 \end{bmatrix}$ dan $L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.2863E-06 \end{bmatrix}$.

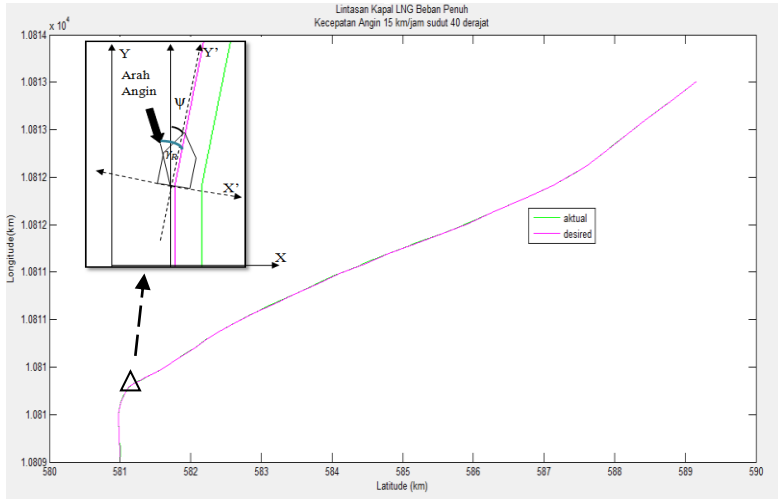


Gambar 4. 14 Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Beban Penuh Dengan Gangguan Angin 15 km/jam dengan sudut 30 derajat

Nilai kesalahan (*error*) maksimal pada gambar 4.14 untuk sumbu X (*latitude*) adalah 0.001028 km , sedangkan nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu Y (*longitude*) adalah 0.001028km. Sedangkan nilai rata-rata dari kesalahan (*error*) lintasan untuk sumbu X dan sumbu Y adalah 0.00082 km dan 0.00043 km .

- Kecepatan angin 15 km/jam dengan sudut 40 derajat

Nilai *gain* regulator K dan estimator L yang digunakan adalah $K = [3.8759 \quad 18.3145 \quad -1.2732]$ dan $L = [0 ; 0 ; 0.2378E-07]$.

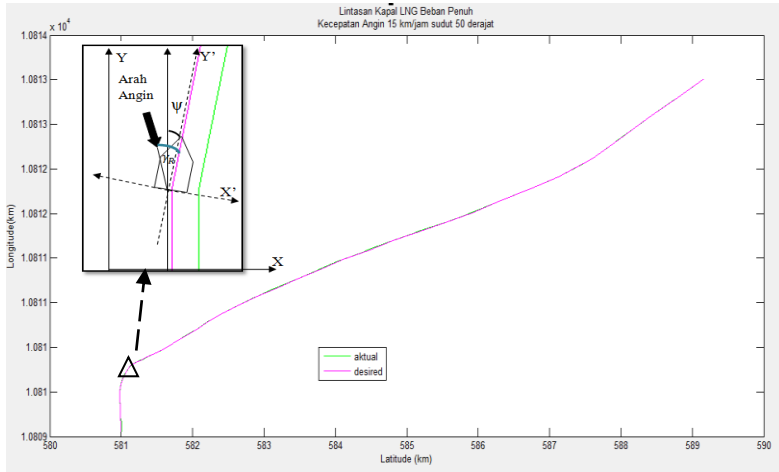


Gambar 4. 15 Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Beban Penuh Dengan Gangguan Angin 15 km/jam dengan sudut 40 derajat

Nilai kesalahan (*error*) maksimal pada gambar 4.15 untuk sumbu X (*latitude*) adalah 0.001028 km , sedangkan nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu Y (*longitude*) adalah 0.001028km. Sedangkan nilai rata-rata dari kesalahan (*error*) lintasan untuk sumbu X dan sumbu Y adalah 0.00082 km dan 0.00043 km .

- Kecepatan angin 15 km/jam dengan sudut 50 derajat

Nilai *gain* regulator K dan estimator L yang digunakan adalah $K = \begin{bmatrix} 3.8759 & 18.3145 & -1.2732 \end{bmatrix}$ dan $L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.4224E-07 \end{bmatrix}$.



Gambar 4. 16 Hasil Simulasi Lintasan Kapal LNG Beban Penuh Dengan Gangguan Angin 15 km/jam dengan sudut 50 derajat

Gambar 4.11 hingga Gambar 4.16 menunjukkan bahwa lintasan aktual kapal ketika diberikan gangguan angin tidak berbeda jauh dari lintasan kapal yang diinginkan sesuai dengan data lintasan di Pelabuhan Arun. Ketika kapal yang memiliki beban penuh (*Deadweight ton*) diberikan gangguan beban angin dengan kecepatan 1.5 km/jam dan 15 km/jam pada sudut yang bervariasi yaitu 30° , 40° , dan 50° menghasilkan lintasan yang sama dan nilai kesalahan (*error*) yang sama. Nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu X (*latitude*) adalah 0.001028 km, sedangkan nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu Y (*longitude*) adalah 0.001028 km. Sedangkan nilai rata-rata dari kesalahan (*erro*) lintasan untuk sumbu X dan sumbu Y adalah 0.00082 km dan 0.00043 km. Data lintasan dapat dilihat pada Lampiran D.

Seluruh data lintasan aktual yang didapatkan menunjukkan bahwa sistem kendali optimal menggunakan metode *Linear Quadratic Gaussian* lebih efektif untuk diterapkan pada sistem yang memiliki gangguan dari lingkungan atau dinamakan *disturbance*. Hal ini dapat dilihat dari nilai *error* lintasan yang

dihasilkan. Ketika kapal LNG tidak diberikan gangguan angin lintasan aktual yang dihasilkan memiliki nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu X (*latitude*) adalah 0.2201 km dan nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu Y (*longitude*) adalah 0.1139 km. Sedangkan ketika kapal LNG diberikan gangguan angin lintasan yang dihasilkan memiliki Nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu X (*latitude*) adalah 0.001028 km , sedangkan nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu Y (*longitude*) adalah 0.001028km.

Semua hasil simulasi yang telah dilakukan menunjukkan adanya perbedaan nilai *error* maksimal pada setiap keadaan.

Tabel 4. 1 Nilai *error* lintasan maksimal kapal LNG

Kondisi Kapal LNG	<i>Error</i> Sumbu X (Km)	<i>Error</i> Sumbu Y (Km)
Tanpa Beban Tambahan (Kosong)	0.2201	0.1139
Beban Tambahan Penuh (<i>Deadweight Ton</i>)	0.2166	0.1121
Kosong dan Gangguan Angin 25 Km/jam 30°	0.001028	0.001028
Kosong dan Gangguan Angin 1.5 km/jam 30°	0.001028	0.001028
Kosong dan Gangguan Angin 1.5 km/jam 40°	0.001028	0.001028
Kosong dan Gangguan Angin 1.5 km/jam 50°	0.001028	0.001028
Kosong dan Gangguan Angin 15 km/jam 30°	0.001028	0.001028
Kosong dan Gangguan Angin 15 km/jam 40°	0.001028	0.001028
Kosong dan Gangguan Angin 15 km/jam 50°	0.001028	0.001028
Beban Penuh dan Gangguan Angin 1.5 km/jam 30°	0.001028	0.001028

Tabel 4.1 (Lanjutan)

Kondisi Kapal LNG	<i>Error</i> Sumbu X (Km)	<i>Error</i> Sumbu Y (Km)
Beban Penuh dan Gangguan Angin 1.5 km/jam 40°	0.001028	0.001028
Beban Penuh dan Gangguan Angin 1.5 km/jam 50°	0.001028	0.001028
Beban Penuh dan Gangguan Angin 15 km/jam 30°	0.001028	0.001028
Beban Penuh dan Gangguan Angin 15 km/jam 40°	0.001028	0.001028
Beban Penuh dan Gangguan Angin 15 km/jam 50°	0.001028	0.001028

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang didapatkan dari Tugas Akhir ini yakni sebagai berikut :

1. Metode *Linear Quadratic Gaussian* dapat diterapkan dalam sistem kendali kapal dengan menggunakan persamaan gerak kapal dalam bentuk ruang keadaan (*state-space*) . hasil pengujian yang telah dilakukan pada kapal LNG tanpa beban *error* maksimal untuk sumbu X (*latitude*) adalah 0.1962 km, sedangkan *error* maksimal untuk sumbu Y (*longitude*) adalah 0.1139 km . Kapal LNG beban penuh *error* maksimal untuk sumbu X (*latitude*) adalah 0.1931 km , sedangkan nilai kesalahan (*error*) maksimal untuk sumbu Y (*longitude*) adalah 0.1121. Nilai *error* lintasan yang dihasilkan pada saat kapal LNG memiliki beban tambahan penuh atau DWT (*Deadweight ton*) tidak berbeda jauh dengan *error* lintasan pada saat kapal tidak bermuatan. Hal ini dapat dilihat dari kedua nilai *error* yang dihasilkan dari kedua kapal.
2. Pengujian lintasan kapal dengan adanya gangguan angin kecepatan 1.5 km/jam dan 15 km/jam serta variasi sudut 30°, 40°, 50° menghasilkan nilai yang sama pada setiap kondisi kapal. Nilai kesalahan maksimal X dan Y pada lintasan kapal kosong dan kapal beban penuh memiliki nilai yang sama yaitu 0.001028 km. Seluruh data lintasan aktual yang telah didapatkan menunjukkan bahwa sistem kendali optimal menggunakan metode *Linear Quadratic Gaussian* lebih efektif untuk diterapkan pada sistem yang memiliki gangguan dari lingkungan Hal ini dapat dilihat dari nilai kesalahan lintasan yang dihasilkan.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya antara lain :

1. Dapat ditambahkan gangguan lingkungan lainnya seperti variasi frekuensi gelombang laut, dan lainnya.

2. Dapat ditambahkan analisa mengenai gesekan permukaan air laut terhadap gerakan kapal.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M. A. (2015). *Perancangan Sistem Kendali Logika Fuzzy Kapal Perang Kawal Rudal – Kri Diponegoro Kelas Sigma Untuk Memperoleh Sinyal Kendali Optimal*. Jurusan Teknik Fisika-ITS.
- Anonim. (t.thn.). *Windguru*. Dipetik 01 21, 2017, dari Windguru:
https://www.windguru.cz/archive.php?id_spot=485951&id_model=3
- Baihaqie, Muhammad Zulizar, et all. (2014). Analisis Gerakan Sway, Heave, Dan Roll Pada Offshore Platform Menggunakan Metode Kontrol Optimal Linear Quadratic Regulator. *Jurusan Teknik Fisika*.
- Bryson, A. r., & Ho, Y.-C. (1975). *Applied Optimal Control*.
- Cahyoko, A. T. (2016). Optimal Tracking Control Pada Kapal Tanker Tangguh Towuti Berbasis Logika Fuzzy di Pelabuhan Arun. *Jurusan Teknik Fisika*.
- Cimen, T. (2008). State-Dependent Riccati Equation (SDRE) Control : A Survey. *IFAC*.
- Eide, R. e. (2011). LQG Control Design for Balancing an Inverted Pendulum Mobile.
- Fossen, T. I. (1994). *Guidance and Control of Ocean Vehicle*.
- Fossen, T. I. (2011). *Handbook Of Marine Craft Hydrodynamics And Motion Control*.
- Juliana. (2014). Kontrol Optimal pada Balancing Robot Menggunakan Linear Quadratic Regulator. *e-jurnal Teknik Elektro*.
- Lewis, F. L., Vrabie, D., & Syrmos, V. L. (2012). *Optimal Control*.
- Milatina, N. O. (2016). Perancangan Sistem Kendali

Manuver Berbasis Logika Fuzzy Untuk Anti Tabrakan Kapal Berdasarkan Nilai DCPA-TCPA. *Jurusan Teknik Fisika* .

Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering fifth edition Resolution MSC, Vol.137*. (2002).

Rodliyah, Dinayati, dkk. (2010). PERANCANGAN SISTEM KENDALI OPTIMAL MULTIVARIABEL LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN (LQG) PADA KAPAL FPB 38 UNTUK MENINGKATKAN PERFORMANSI MANUVERING. *Jurusan Teknik Fisika* .

Supriyono. (2011). Perancangan dan Simulasi Pengendalian Sistem Gerak Rotasi Quadrotor Menggunakan Linear quadratic Gaussian (LQG). *Universitas Indonesia* .

LAMPIRAN A

PERHITUNGAN SISTEM DINAMIKA KAPAL

Tabel 3.1 menjadi data utama pemodelan dinamika kapal. Persamaan 2.14 sampai dengan persamaan 2.25 merupakan persamaan koefisien hidrodinamika yang menyusun matriks dinamika kapal. Kemudian nilai koefisien hidrodinamika dimasukkan dalam matriks non dimensional dibawah ini.

$$M' = \begin{bmatrix} m' - Y_{\dot{v}}' & m'x_g' - Y_{\dot{r}}' \\ m'x_g' - N_{\dot{v}}' & I_z' - N_{\dot{r}}' \end{bmatrix}$$

$$N(u_0)' = \begin{bmatrix} -Y_v' & m'u_0' - Y_r' \\ -N_v' & m'x_g'u_0' - N_r' \end{bmatrix}$$

$$b' = \begin{bmatrix} Y_{\delta}' \\ N_{\delta}' \end{bmatrix}$$

Setelah nilai matriks didapatkan kemudian dinormalisasi menjadi nilai matiks M, N dan B dengan cara berikut ini .

$$\begin{bmatrix} \frac{L}{U^2} m'_{11} & \frac{L^2}{U^2} m'_{12} \\ \frac{L}{U^2} m'_{21} & \frac{L^2}{U^2} m'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{U} n'_{11} & \frac{L}{U} n'_{12} \\ \frac{1}{U} n'_{21} & \frac{L}{U} n'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b'_1 \\ b'_2 \end{bmatrix} \delta_R$$

Dimana nilai L adalah panjang kapal dan U adalah kecepatan kapal.

Setelah didapatkan nilai masing-masing matriks M, N dan b dimensional maka digunakan untuk menentukan matriks persamaan *state space*.

$$A = -M^{-1} N$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

$$B = M^{-1} b$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{bmatrix}$$

M^{-1} merupakan bentuk invers matriks M .

Kemudian untuk mengendalikan gerak kapal pada lintasannya menggunakan 2 DOF yaitu sway dan yaw maka diperlukan satu baris matriks tambahan yang berfungsi memunculkan nilai sudut pada persamaan state space seperti berikut.

$$\begin{bmatrix} \ddot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ 0 \end{bmatrix} \delta$$

LAMPIRAN B

NILAI Q dan R TERHADAP PERFORMANSI (LQG)

$$Q_{ii} = \frac{1}{\text{maximum acceptable value of } z_i^2}, \quad i \in \{1, 2, \dots, \ell\},$$

$$R_{jj} = \frac{1}{\text{maximum acceptable value of } u_j^2}, \quad j \in \{1, 2, \dots, k\},$$

$$\text{Matriks Q} = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & 0 \\ 0 & q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & q_{33} \end{bmatrix}$$

q_{11} dan q_{22} merupakan nilai dari $\frac{1}{y^2}$.

Error didapatkan dari hasil simulasi ppada sistem menggunakan nilai gain K (*lqr*) dan L (kalman filter). K didapatkan menggunakan function *lqr* pada MATLAB, sedangkan L didapatkan dengan menggunakan function *place*.

```
clear all;
clc;

A = [-0.013305999 4.612316462 0 ; -0.001348613 -
0.147470416 0 ; 0 1 0];
C = [0 0 1 ];
B = [0.118513107 ; -0.000445243 ; 0 ];
D=0;
sys=ss(A,B,C,D);
step(sys)
Q1=[25.66405 0 0 ; 0 16.66263 0 ; 0 0 3.204787];
Q2=[16.66263 0 0 ; 0 3.204787 0 ; 0 0 1.621139];
Q3=[3.204787 0 0; 0 1.621139 0 ;0 0 0.904185 ];
Q4=[1.621139 0 0; 0 0.904185 0 ; 0 0 0.680732];
Q5=[0.904185 0 0; 0 0.680732 0 ; 0 0 0.735655];
Q6=[0.680732 0 0 ; 0 0.735655 0 ; 0 0 0.669637];
Q7=[0.735655 0 0 ; 0 0.669637 0 ; 0 0 0.705821];
Q8=[0.669637 0 0; 0 0.705821 0 ;0 0 0.763871 ];
Q9=[0.705821 0 0; 0 0.763871 0 ; 0 0 0.815808];
```

```

Q10=[0.763871 0 0; 0 0.815808 0 ; 0 0 0.7774];
Q11=[0.815808 0 0; 0 0.7774 0 ; 0 0 0.851185];
Q12=[0.7774 0 0; 0 0.851185 0 ; 0 0 0.752773];
Q13=[0.851185 0 0; 0 0.752773 0 ; 0 0 0.727682];
Q14=[0.752773 0 0; 0 0.727682 0 ; 0 0 0.696988];
Q15=[0.727682 0 0; 0 0.696988 0 ; 0 0 0.640978];
Q16=[0.696988 0 0; 0 0.640978 0 ; 0 0 0.65294];
Q17=[0.640978 0 0; 0 0.65294 0 ; 0 0 0.651691];
Q18=[0.65294 0 0; 0 0.651691 0 ; 0 0 0.651691];
Q19=[0.651691 0 0 ; 0 0.651691 0; 0 0 0.602567];
Q20=[0.651691 0 0; 0 0.602567 0 ; 0 0 0.622045];
Q21=[0.602567 0 0; 0 0.622045 0 ; 0 0 0.594797];
Q22=[0.622045 0 0; 0 0.594797 0 ; 0 0 0.580919];
Q23=[0.594797 0 0; 0 0.580919 0 ; 0 0 0.613644];
Q24=[0.580919 0 0; 0 0.613644 0; 0 0 0.632715];
Q25=[0.613644 0 0; 0 0.632715 0; 0 0 0.632715 ];
Q26=[0.632715 0 0; 0 0.632715 0; 0 0 0.649841];
Q27=[0.632715 0 0 ; 0 0.649841 0; 0 0 0.735655];
Q28=[0.649841 0 0; 0 0.735655 0; 0 0 0.909812];
Q29=[0.735655 0 0 ; 0 0.909812 0;0 0 0.913979];
Q30=[0.909812 0 0; 0 0.913979 0;0 0 0.899193];
Q31=[0.913979 0 0; 0 0.899193 0;0 0 0.909812];

```

```

R=1;

```

```

K1=lqr(sys,Q1,R)
p1= eig(A-B*K1);
pt1=transpose(p1);
L1=place(A',C',pt1)

```

```

K2=lqr(sys,Q2,R)
p2= eig(A-B*K2);
pt2=transpose(p2);
L2=place(A',C',pt2)

```

```

K3=lqr(sys,Q3,R)
p3= eig(A-B*K3);
pt3=transpose(p3);
L3=place(A',C',pt3)

```

```
K4=lqr(sys,Q4,R)
p4= eig(A-B*K4);
pt4=transpose(p4);
L4=place(A',C',pt4)
```

```
K5=lqr(A,B,Q5,R)
p5= eig(A-B*K5);
pt5=transpose(p5);
L5=place(A',C',pt5)
```

```
K6=lqr(sys,Q6,R)
p6= eig(A-B*K6);
pt6=transpose(p6);
L6=place(A',C',pt6)
```

```
K7=lqr(sys,Q7,R)
p7= eig(A-B*K7);
pt7=transpose(p7);
L7=place(A',C',pt7)
```

```
K8=lqr(sys,Q8,R)
p8= eig(A-B*K8);
pt8=transpose(p8);
L8=place(A',C',pt8)
```

```
K9=lqr(sys,Q9,R)
p9= eig(A-B*K9);
pt9=transpose(p9);
L9=place(A',C',pt9)
```

```
K10=lqr(sys,Q10,R)
p10= eig(A-B*K10);
pt10=transpose(p10);
L10=place(A',C',pt10)
```

```
K11=lqr(sys,Q11,R)
p11= eig(A-B*K11);
pt11=transpose(p11);
L11=place(A',C',pt11)
```

```
K12=lqr(sys,Q12,R)
p12= eig(A-B*K12);
pt12=transpose(p12);
L12=place(A',C',pt12)
```

```
K13=lqr(sys,Q13,R)
p13= eig(A-B*K13);
pt13=transpose(p13);
L13=place(A',C',pt13)
```

```
K14=lqr(sys,Q14,R)
p14= eig(A-B*K14);
pt14=transpose(p14);
L14=place(A',C',pt14)
```

```
K15=lqr(sys,Q15,R)
p15= eig(A-B*K15);
pt15=transpose(p15);
L15=place(A',C',pt15)
```

```
K16=lqr(sys,Q16,R)
p16= eig(A-B*K16);
pt16=transpose(p16);
L16=place(A',C',pt16)
```

```
K17=lqr(sys,Q17,R)
p17= eig(A-B*K17);
pt17=transpose(p17);
L17=place(A',C',pt17)
```

```
K18=lqr(sys,Q18,R)
p18= eig(A-B*K18);
pt18=transpose(p18);
L18=place(A',C',pt18)
```

```
K19=lqr(sys,Q19,R)
p19= eig(A-B*K19);
pt19=transpose(p19);
L19=place(A',C',pt19)
```

```
K20=lqr(sys,Q20,R)
p20= eig(A-B*K20);
pt20=transpose(p20);
L20=place(A',C',pt20)
```

```
K21=lqr(sys,Q21,R)
p21= eig(A-B*K21);
pt21=transpose(p21);
L21=place(A',C',pt21)
```

```
K22=lqr(sys,Q22,R)
p22= eig(A-B*K22);
pt22=transpose(p22);
L22=place(A',C',pt22)
```

```
K23=lqr(sys,Q23,R)
p23= eig(A-B*K23);
pt23=transpose(p23);
L23=place(A',C',pt23)
```

```
K24=lqr(sys,Q24,R)
p24= eig(A-B*K24);
pt24=transpose(p24);
L24=place(A',C',pt24)
```

```
K25=lqr(sys,Q25,R)
p25= eig(A-B*K25);
pt25=transpose(p25);
L25=place(A',C',pt25)
```

```
K26=lqr(sys,Q26,R)
p26= eig(A-B*K26);
pt26=transpose(p26);
L26=place(A',C',pt26)
```

```
K27=lqr(sys,Q27,R)
p27= eig(A-B*K27);
pt27=transpose(p27);
L27=place(A',C',pt27)
```

```
K28=lqr(sys,Q28,R)
p28= eig(A-B*K28);
pt28=transpose(p28);
L28=place(A',C',pt28)
```

```
K29=lqr(sys,Q29,R)
p29= eig(A-B*K29);
pt29=transpose(p29);
L29=place(A',C',pt29)
```

```
K30=lqr(sys,Q30,R)
p30= eig(A-B*K30);
pt30=transpose(p30);
L30=place(A',C',pt30)
```

```
K31=lqr(sys,Q31,R)
p31= eig(A-B*K31);
pt31=transpose(p31);
L31=place(A',C',pt31)
```

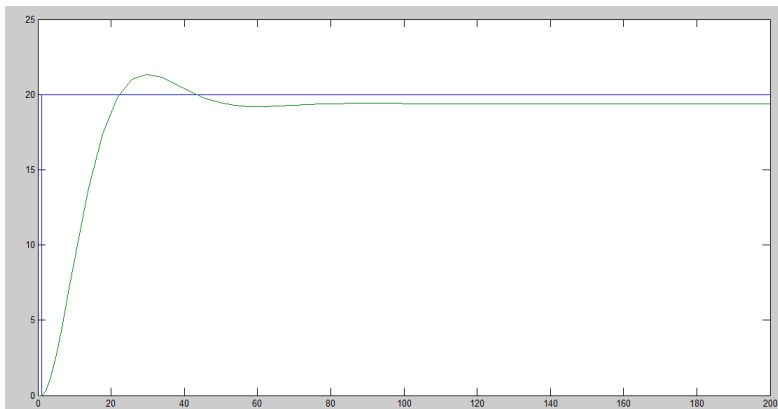
```
K1 = 4.8616  16.1925 -1.7902
L1 = 3.0507 -0.0184  0.5690
K2 = 3.8759  18.3145 -1.2732
L2 = 2.4308 -0.0152  0.4512
K3 = 1.5605  12.4733 -0.9509
L3 = 0.9082 -0.0064  0.1794
K4 = 1.0398  9.5413 -0.8251
L4 = 0.5780 -0.0043  0.1190
K5 = 0.7287  6.3376 -0.8577
L5 = 0.3732 -0.0029  0.0835
K6 = 0.6092  5.2266 -0.8183
L6 = 0.3003 -0.0023  0.0699
K7 = 0.6406  5.4622 -0.8401
L7 = 0.3183 -0.0025  0.0735
K8 = 0.6067  4.8600 -0.8740
```


L8 = 0.2933 -0.0023 0.0697
K9 = 0.6285 4.9380 -0.9032
L9 = 0.3044 -0.0023 0.0723
K10 = 0.6582 5.4104 -0.8817
L10 = 0.3256 -0.0025 0.0756
K11 = 0.6878 5.4917 -0.9226
L11 = 0.3406 -0.0026 0.0791
K12 = 0.6645 5.5674 -0.8676
L12 = 0.3310 -0.0026 0.0763
K13 = 0.7018 6.0731 -0.8530
L13 = 0.3564 -0.0027 0.0805
K14 = 0.6495 5.5960 -0.8349
L14 = 0.3245 -0.0025 0.0745
K15 = 0.6338 5.6238 -0.8006
L15 = 0.3177 -0.0025 0.0726
K16 = 0.6175 5.3876 -0.8080
L16 = 0.3066 -0.0024 0.0708
K17 = 0.5862 5.0175 -0.8073
L17 = 0.2866 -0.0022 0.0672
K18 = 0.5929 5.0992 -0.8073
L18 = 0.2909 -0.0023 0.0680
K19 = 0.5902 5.2531 -0.7763
L19 = 0.2921 -0.0023 0.0676
K20 = 0.5910 5.1881 -0.7887
L20 = 0.2915 -0.0023 0.0677
K21 = 0.5616 4.9342 -0.7712
L21 = 0.2744 -0.0022 0.0644
K22 = 0.5723 5.1202 -0.7622
L22 = 0.2821 -0.0022 0.0655
K23 = 0.5580 4.8158 -0.7834
L23 = 0.2709 -0.0021 0.0640
K24 = 0.5507 4.6526 -0.7954
L24 = 0.2651 -0.0021 0.0632
K25 = 0.5697 4.8884 -0.7954
L25 = 0.2772 -0.0022 0.0653
K26 = 0.5814 4.9665 -0.8061
L26 = 0.2837 -0.0022 0.0667

$K27 = 0.5849 \quad 4.6979 \quad -0.8577$
 $L27 = 0.2809 \quad -0.0022 \quad 0.0672$
 $K28 = 0.6009 \quad 4.3102 \quad -0.9538$
 $L28 = 0.2819 \quad -0.0022 \quad 0.0693$
 $K29 = 0.6478 \quad 4.8398 \quad -0.9560$
 $L29 = 0.3118 \quad -0.0024 \quad 0.0746$
 $K30 = 0.7366 \quad 5.8620 \quad -0.9483$
 $L30 = 0.3696 \quad -0.0028 \quad 0.0847$
 $K31 = 0.7389 \quad 5.8526 \quad -0.9538$
 $L31 = 0.3706 \quad -0.0028 \quad 0.0850$

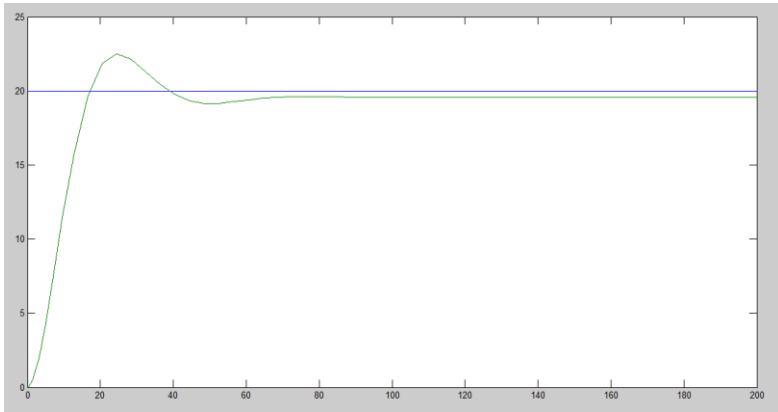
Nilai K dan L dipasang dalam sistem close loop dengan memberikan nilai set point 20° . Hal ini dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem dilihat dari karakteristik respon sistem.

- Untuk K1 dan L1



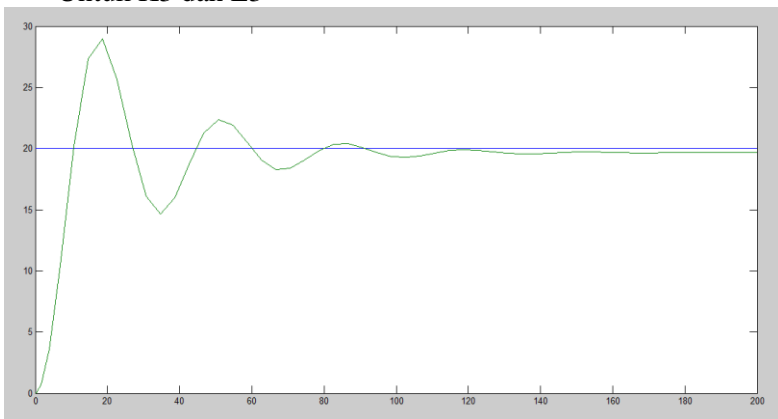
Pada sistem yang dipasang nilai K1 dan L1 memiliki karakteristik respon sistem sebagai berikut yakni nilai maximum overshoot 6,69 % (1,3376), nilai *error* steady state 3 % (0.6059) dan settling time 164,5 detik.

- Untuk K2 dan L2



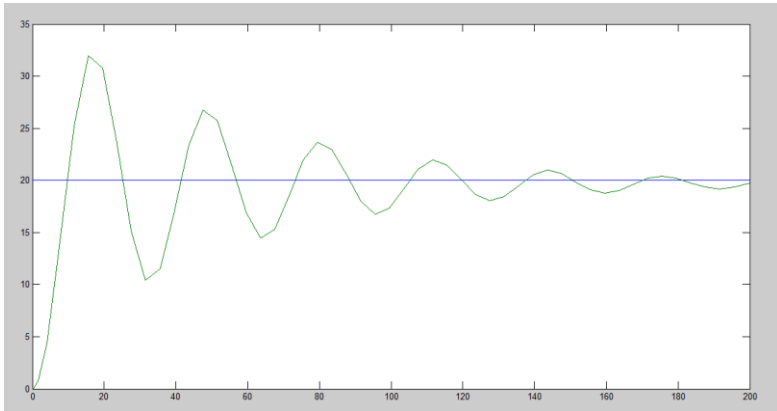
Pada sistem yang dipasang nilai K2 dan L2 memiliki karakteristik respon sistem sebagai berikut yakni nilai maximum overshoot 12,555 % (2,511), nilai *error* steady state 2,17 % (0.43477) dan settling time 62,8 detik.

- Untuk K3 dan L3



Pada sistem yang dipasang nilai K3 dan L3 memiliki karakteristik respon sistem sebagai berikut yakni nilai maximum overshoot 44,7 % (8.94), nilai *error* steady state 1,67% (0.3349) dan settling time 199 detik.

- Untuk K4 dan L4



Pada sistem yang dipasang nilai K4 dan L4 memiliki karakteristik respon sistem sebagai berikut yakni nilai maximum overshoot 59,7 % (11,953), belum mencapai steady pada waktu 200 detik.

Untuk nilai K dan L 5 hingga 31 menghasilkan sistem yang tidak stabil dan memiliki *error* sangat tinggi.

Kemudian untuk nilai gain estimator dengan gangguan angin dapat digunakan.

```
clear all;
clc;
```

```
A = [ -0.013305999 4.612316462 0; -0.001348613 -
0.147470416 0 ; 0 1 0 ];
B = [ 0.118513107 ; -0.000445243 ; 0 ];
C = [ 0 0 1 ];
D = 0;
H=0;
```

```

G = [3.44573E-05 ; 1.13393E-06 ; 0]; %1.5 km/jam
30 derajat
G1 = [4.65622E-05 ; 1.20844E-06 ; 0]; %1.5
km/jam 40 derajat
G2 = [6.61557E-05 ; 1.20439E-06 ; 0]; %1.5
km/jam 50 derajat
G3 = [1.17406E-05 ; 3.86364E-07 ; 0]; %15 km/jam
30 derajat
G4 = [1.33994E-06 ; 3.4776E-08 ; 0]; %15 km/jam
40 derajat
G5 = [6.08238E-06 ; 1.10732E-07 ; 0]; %15 km/jam
50 derajat

```

```

Gt=transpose(G);
Gt1=transpose(G1);
Gt2=transpose(G2);
Gt3=transpose(G3);
Gt4=transpose(G4);
Gt5=transpose(G5);

```

```

Qn=cov(G,Gt)
Qn1=cov(G1,Gt1)
Qn2=cov(G2,Gt2)
Qn3=cov(G3,Gt3)
Qn4=cov(G4,Gt4)
Qn5=cov(G5,Gt5)

```

```

sys = ss(A,[B G],C,[D H])
sys1 = ss(A,[B G1],C,[D H]);
sys2 = ss(A,[B G2],C,[D H]);
sys3 = ss(A,[B G3],C,[D H]);
sys4 = ss(A,[B G4],C,[D H]);
sys5 = ss(A,[B G5],C,[D H]);

```

```

Rn=1;

```

```

[kest,L,P] = kalman(sys,Qn,Rn)
[kest1,L1,P1] = kalman(sys1,Qn1,Rn)
[kest2,L2,P2] = kalman(sys2,Qn2,Rn)
[kest3,L3,P3] = kalman(sys3,Qn3,Rn)

```

```
[kest4,L4,P4] = kalman(sys4,Qn4,Rn)
[kest5,L5,P5] = kalman(sys5,Qn5,Rn)
```

[illegible]

γ_w (deg)	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	S.E.
10	0.0596	0.061	—	—	—	−0.074	0.0048
20	0.1106	0.204	—	—	—	−0.170	0.0074
30	0.2258	0.245	—	—	—	−0.380	0.0105
40	0.2017	0.457	—	0.0067	—	−0.472	0.0137
50	0.1759	0.573	—	0.0118	—	−0.523	0.0149
60	0.1925	0.480	—	0.0115	—	−0.546	0.0133
70	0.2133	0.315	—	0.0081	—	−0.526	0.0125
80	0.1827	0.254	—	0.0053	—	−0.443	0.0123
90	0.2627	—	—	—	—	−0.508	0.0141
100	0.2102	—	−0.0195	—	0.0335	−0.492	0.0146
110	0.1567	—	−0.0258	—	0.0497	−0.457	0.0163
120	0.0801	—	−0.0311	—	0.0740	−0.396	0.0179
130	−0.0189	—	−0.0488	0.0101	0.1128	−0.420	0.0166
140	0.0256	—	−0.0422	0.0100	0.0889	−0.463	0.0162
150	0.0552	—	−0.0381	0.0109	0.0689	−0.476	0.0141
160	0.0881	—	−0.0306	0.0091	0.0366	−0.415	0.0105
170	0.0851	—	−0.0122	0.0025	—	−0.220	0.0057
Mean S.E.							0.0127

	30	40	50
A0	1.965	2.333	1.726
A1	-4.81	-5.99	-6.54
A2	0.243	0.247	0.189
A3	-0.154	-0.19	-0.173
A4	0	0	0.348
A5	0	0	0
A6	0.041	0.042	0.048
B0	0.225	0.329	1.164
B1	1.38	1.82	1.26
B2	0	0	0.121
B3	0.023	0.043	0
B4	0	0	-0.242
B5	-0.29	-0.59	-0.95
B6	0	0	0
C0	0.2258	0.2017	0.1759
C1	0.245	0.457	0.573
C2	0	0	0
C3	0	0.0067	0.0118

C4	0	0	0
C5	-0.38	-0.472	-0.523
C6	0	0	0

$$C_X = A_0 + A_1 \frac{2A_L}{L^2} + A_2 \frac{2A_T}{B^2} + A_3 \frac{L}{B} + A_4 \frac{S}{L} + A_5 \frac{C}{L} + A_6 M$$

$$C_Y = B_0 + B_1 \frac{2A_L}{L^2} + B_2 \frac{2A_T}{B^2} + B_3 \frac{L}{B} + B_4 \frac{S}{L} + B_5 \frac{C}{L} + B_6 \frac{A_{SS}}{A_L}$$

$$C_N = C_0 + C_1 \frac{2A_L}{L^2} + C_2 \frac{2A_T}{B^2} + C_3 \frac{L}{B} + C_4 \frac{S}{L} + C_5 \frac{C}{L}$$

$$X_{wind} = \frac{1}{2} C_X (\gamma_R) \rho_w V_R^2 A_T$$

$$Y_{wind} = \frac{1}{2} C_Y (\gamma_R) \rho_w V_R^2 A_L$$

$$N_{wind} = \frac{1}{2} C_N (\gamma_R) \rho_w V_R^2 A_T L$$

$$V_R = \sqrt{u^2_R + v^2_R} \gamma_R = \tan^{-1} \left(\frac{v_R}{u_R} \right)$$

$$u_R = V_{wind} \cos \gamma_R - u + u_c$$

$$v_R = V_{wind} \sin \gamma_R - v + v_c$$

1.5 km/jam			
	30	40	50
uR	-8.054302257	-7.12547	-5.98036
vR	-4.350550313	-5.87445	-7.22004
VR	9.154183354	9.234799	9.37516

15 km/jam			
	30	40	50
uR	-1.740460305	-1.53975	-1.2923
vR	-5.052088308	-0.28873	-2.53198
VR	5.343481856	1.566585	2.842704

Sudut	30	40	50
Cx	4.691163	4.74865203	5.028756
Cy	0.430565	0.571710174	0.788147
Cn	0.058639	0.061406203	0.059381
1.5 km/jam			
Xw	340241.1	350503.4882	382547.2
Yw	134418.3	181639.6898	258074.3
Nw	1213805	1293564.864	1289224
15 km/jam			
Xw	115930.1	10086.61524	35171.5
Yw	45800.24	5227.136748	23727.43
Nw	413578.9	37225.56696	118531.7

Kemudian dilakukan normalisasi pada nilai gaya dan momen beban angin.

Sudut	30	40	50
Cx	4.691163306	4.74865203	5.028756
Cy	0.430565444	0.571710174	0.788147
Cn	0.058639288	0.061406203	0.059381
1.5 km/jam			
Xw	8.72186E-05	8.98493E-05	9.81E-05
Yw	3.44573E-05	4.65622E-05	6.62E-05
Nw	1.13393E-06	1.20844E-06	1.2E-06
15 km/jam			
Xw	2.97179E-05	2.58564E-06	9.02E-06
Yw	1.17406E-05	1.33994E-06	6.08E-06
Nw	3.86364E-07	3.4776E-08	1.11E-07

LAMPIRAN D HASIL SIMULASI

1. Simulasi pada kapal LNG tanpa beban tambahan

waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	error X	error Y
0	581.0013	10809.0607	581.0024	10809.0607	0.0010	0.0000
1	581.0013	10809.1052	581.0024	10809.0963	0.0010	0.0089
2	581.0013	10809.1497	581.0004	10809.1594	0.0009	0.0097
3	580.9902	10809.2054	580.9912	10809.2149	0.0010	0.0095
4	580.9902	10809.2722	580.9912	10809.2968	0.0010	0.0247
5	580.9902	10809.3501	580.9912	10809.3420	0.0010	0.0082
6	580.9791	10809.4169	580.9801	10809.4383	0.0010	0.0214
7	580.9791	10809.4948	580.9801	10809.4899	0.0010	0.0050
8	580.9902	10809.5505	580.9883	10809.5358	0.0019	0.0147
9	581.0125	10809.6395	581.0322	10809.6695	0.0198	0.0299
10	581.0681	10809.7286	581.0768	10809.7362	0.0086	0.0076
11	581.1238	10809.7843	581.1213	10809.7808	0.0025	0.0035
12	581.2017	10809.8288	581.1822	10809.8171	0.0195	0.0117
13	581.2908	10809.8622	581.3180	10809.8737	0.0272	0.0115
14	581.3687	10809.8956	581.3864	10809.9020	0.0177	0.0064
15	581.4912	10809.9401	581.4843	10809.9377	0.0068	0.0024
16	581.6025	10809.9846	581.5740	10809.9735	0.0285	0.0111
17	581.7249	10810.0403	581.7781	10810.0673	0.0531	0.0270
18	581.8808	10810.1182	581.9041	10810.1298	0.0234	0.0115
19	582.0478	10810.1961	582.0376	10810.1922	0.0102	0.0040
20	582.2370	10810.2963	582.1874	10810.2709	0.0496	0.0254
21	582.4374	10810.3854	582.5086	10810.4164	0.0712	0.0310
22	582.6489	10810.4744	582.6838	10810.4892	0.0349	0.0147
23	582.9049	10810.5746	582.8885	10810.5693	0.0165	0.0053
24	583.1721	10810.6637	583.1014	10810.6412	0.0707	0.0225

waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	error X	error Y
25	583.4615	10810.7639	583.5697	10810.8022	0.1082	0.0384
26	583.7843	10810.8752	583.8279	10810.8912	0.0435	0.0160
27	584.1072	10810.9865	584.0861	10810.9802	0.0211	0.0063
28	584.4523	10811.0867	584.3607	10811.0610	0.0916	0.0257
29	584.8085	10811.1980	584.9276	10811.2324	0.1191	0.0343
30	585.1647	10811.2982	585.2156	10811.3125	0.0509	0.0143
31	585.5432	10811.3984	585.5184	10811.3926	0.0248	0.0058
32	585.9106	10811.5097	585.8129	10811.4809	0.0976	0.0288
33	586.3224	10811.6433	586.4602	10811.6887	0.1377	0.0454
34	586.7343	10811.7769	586.7866	10811.7956	0.0523	0.0187
35	587.1239	10811.9105	587.0983	10811.9024	0.0256	0.0081
36	587.5915	10812.1108	587.7877	10812.2247	0.1962	0.1139
37	587.9588	10812.3224	588.1003	10812.4052	0.1415	0.0828
38	588.3819	10812.5673	588.4372	10812.5996	0.0554	0.0324
39	588.7937	10812.8010	588.7667	10812.7867	0.0270	0.0144
40	589.1611	10813.0125	589.1602	10813.0130	0.0009	0.0005
MAX					0.1962	0.1139
Rata-rata					0.0406	0.0198

2. Simulasi pada kapal LNG beban penuh

Lintasan Kapal LNG Beban Penuh gangguan Angin 1.5 km/jam Sudut 30 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
0	581.001344	10809.060680	581.002372	10809.060680	0.001028	0.000000
1	581.001344	10809.105208	581.002372	10809.105208	0.001028	0.000000
2	581.001344	10809.149736	581.002372	10809.149735	0.001028	0.000001
3	580.990212	10809.205396	580.991240	10809.205394	0.001028	0.000002
4	580.990212	10809.272188	580.991240	10809.272177	0.001028	0.000011

Lintasan Kapal LNG Beban Penuh gangguan Angin 1.5 km/jam Sudut 30 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
5	580.990212	10809.350112	580.991240	10809.350091	0.001028	0.000021
6	580.979080	10809.416904	580.980108	10809.416881	0.001028	0.000023
7	580.979080	10809.494828	580.980108	10809.494803	0.001028	0.000025
8	580.990212	10809.550488	580.991239	10809.550456	0.001027	0.000032
9	581.012476	10809.639544	581.013504	10809.639513	0.001028	0.000031
10	581.068136	10809.728600	581.069164	10809.728590	0.001028	0.000010
11	581.123796	10809.784260	581.124823	10809.784294	0.001027	0.000034
12	581.201720	10809.828788	581.202743	10809.828892	0.001023	0.000104
13	581.290776	10809.862184	581.291784	10809.862383	0.001008	0.000199
14	581.368700	10809.895580	581.369672	10809.895915	0.000972	0.000335
15	581.491152	10809.940108	581.492062	10809.940587	0.000910	0.000479
16	581.602472	10809.984636	581.603288	10809.985265	0.000816	0.000629
17	581.724924	10810.040296	581.725615	10810.041061	0.000691	0.000765
18	581.880772	10810.118220	581.881316	10810.119092	0.000544	0.000872
19	582.047752	10810.196144	582.048136	10810.197094	0.000384	0.000950
20	582.236996	10810.296332	582.237215	10810.297334	0.000219	0.001002
21	582.437372	10810.385388	582.437428	10810.386416	0.000056	0.001028
22	582.648880	10810.474444	582.648781	10810.475463	0.000099	0.001019
23	582.904916	10810.574632	582.904674	10810.575629	0.000242	0.000997
24	583.172084	10810.663688	583.171712	10810.664648	0.000372	0.000960
25	583.461516	10810.763876	583.461026	10810.764784	0.000490	0.000908
26	583.784344	10810.875196	583.783751	10810.876039	0.000593	0.000843
27	584.107172	10810.986516	584.106492	10810.987291	0.000680	0.000775
28	584.452264	10811.086704	584.451515	10811.087404	0.000749	0.000700
29	584.808488	10811.198024	584.807682	10811.198658	0.000806	0.000634
30	585.164712	10811.298212	585.163864	10811.298791	0.000848	0.000579
31	585.543200	10811.398400	585.542318	10811.398928	0.000882	0.000528
32	585.910556	10811.509720	585.909647	10811.510200	0.000909	0.000480

Lintasan Kapal LNG Beban Penuh gangguan Angin 1.5 km/jam Sudut 30 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
33	586.322440	10811.643304	586.321512	10811.643741	0.000928	0.000437
34	586.734324	10811.776888	586.733383	10811.777304	0.000941	0.000416
35	587.123944	10811.910472	587.122995	10811.910865	0.000949	0.000393
36	587.591488	10812.110848	587.590534	10812.111233	0.000954	0.000385
37	587.958844	10812.322356	587.957888	10812.322739	0.000956	0.000383
38	588.381860	10812.567260	588.380908	10812.567648	0.000952	0.000388
39	588.793744	10812.801032	588.792801	10812.801439	0.000943	0.000407
40	589.161100	10813.012540	589.160169	10813.012976	0.000931	0.000436
MIN					0.000056	0.000000
MAX					0.001028	0.001028
Rata-rata					0.000809	0.000444

3. Simulasi pada kapal LNG Kosong dengan adanya gangguan angin

Lintasan Kapal LNG Kosong gangguan Angin 1.5 km/jam Sudut 30 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
0	581.001344	10809.060680	581.002372	10809.060680	0.001028	0.000000
1	581.001344	10809.105208	581.002372	10809.105207	0.001028	0.000001
2	581.001344	10809.149736	581.002372	10809.149731	0.001028	0.000005
3	580.990212	10809.205396	580.991240	10809.205390	0.001028	0.000006
4	580.990212	10809.272188	580.991240	10809.272172	0.001028	0.000016
5	580.990212	10809.350112	580.991240	10809.350087	0.001028	0.000025
6	580.979080	10809.416904	580.980108	10809.416881	0.001028	0.000023
7	580.979080	10809.494828	580.980108	10809.494804	0.001028	0.000024
8	580.990212	10809.550488	580.991239	10809.550457	0.001027	0.000031
9	581.012476	10809.639544	581.013504	10809.639519	0.001028	0.000025
10	581.068136	10809.728600	581.069164	10809.728601	0.001028	0.000001
11	581.123796	10809.784260	581.124823	10809.784314	0.001027	0.000054
12	581.201720	10809.828788	581.202739	10809.828923	0.001019	0.000135

Lintasan Kapal LNG Kosong gangguan Angin 1.5 km/jam Sudut 30 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
13	581.290776	10809.862184	581.291774	10809.862427	0.000998	0.000243
14	581.368700	10809.895580	581.369650	10809.895974	0.000950	0.000394
15	581.491152	10809.940108	581.492024	10809.940655	0.000872	0.000547
16	581.602472	10809.984636	581.603228	10809.985337	0.000756	0.000701
17	581.724924	10810.040296	581.725533	10810.041128	0.000609	0.000832
18	581.880772	10810.118220	581.881216	10810.119147	0.000444	0.000927
19	582.047752	10810.196144	582.048025	10810.197131	0.000273	0.000987
20	582.236996	10810.296332	582.237100	10810.297353	0.000104	0.001021
21	582.437372	10810.385388	582.437316	10810.386416	0.000056	0.001028
22	582.648880	10810.474444	582.648676	10810.475448	0.000204	0.001004
23	582.904916	10810.574632	582.904579	10810.575601	0.000337	0.000969
24	583.172084	10810.663688	583.171629	10810.664612	0.000455	0.000924
25	583.461516	10810.763876	583.460954	10810.764741	0.000562	0.000865
26	583.784344	10810.875196	583.783688	10810.875991	0.000656	0.000795
27	584.107172	10810.986516	584.106438	10810.987240	0.000734	0.000724
28	584.452264	10811.086704	584.451469	10811.087352	0.000795	0.000648
29	584.808488	10811.198024	584.807643	10811.198606	0.000845	0.000582
30	585.164712	10811.298212	585.163833	10811.298743	0.000879	0.000531
31	585.543200	10811.398400	585.542293	10811.398885	0.000907	0.000485
32	585.910556	10811.509720	585.909627	10811.510159	0.000929	0.000439
33	586.322440	10811.643304	586.321495	10811.643705	0.000945	0.000401
34	586.734324	10811.776888	586.733370	10811.777273	0.000954	0.000385
35	587.123944	10811.910472	587.122984	10811.910839	0.000960	0.000367
36	587.591488	10812.110848	587.590525	10812.111210	0.000963	0.000362
37	587.958844	10812.322356	587.957880	10812.322718	0.000964	0.000362
38	588.381860	10812.567260	588.380900	10812.567629	0.000960	0.000369
39	588.793744	10812.801032	588.792793	10812.801421	0.000951	0.000389
40	589.161100	10813.012540	589.160161	10813.012959	0.000939	0.000419

Lintasan Kapal LNG Kosong gangguan Angin 1.5 km/jam Sudut 30 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
MIN					0.000056	0.000000
MAX					0.001028	0.001028
Rata-rata					0.000813	0.000440

Lintasan Kapal LNG Kosong gangguan Angin 1.5 km/jam Sudut 40 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
0	581.001344	10809.060680	581.002372	10809.060680	0.001028	0.000000
1	581.001344	10809.105208	581.002372	10809.105206	0.001028	0.000002
2	581.001344	10809.149736	581.002372	10809.149729	0.001028	0.000007
3	580.990212	10809.205396	580.991240	10809.205388	0.001028	0.000008
4	580.990212	10809.272188	580.991240	10809.272172	0.001028	0.000016
5	580.990212	10809.350112	580.991240	10809.350089	0.001028	0.000023
6	580.979080	10809.416904	580.980108	10809.416886	0.001028	0.000018
7	580.979080	10809.494828	580.980108	10809.494811	0.001028	0.000017
8	580.990212	10809.550488	580.991240	10809.550464	0.001028	0.000024
9	581.012476	10809.639544	581.013504	10809.639526	0.001028	0.000018
10	581.068136	10809.728600	581.069164	10809.728604	0.001028	0.000004
11	581.123796	10809.784260	581.124823	10809.784313	0.001027	0.000053
12	581.201720	10809.828788	581.202741	10809.828911	0.001021	0.000123
13	581.290776	10809.862184	581.291780	10809.862402	0.001004	0.000218
14	581.368700	10809.895580	581.369665	10809.895936	0.000965	0.000356
15	581.491152	10809.940108	581.492053	10809.940605	0.000901	0.000497
16	581.602472	10809.984636	581.603276	10809.985280	0.000804	0.000644
17	581.724924	10810.040296	581.725601	10810.041074	0.000677	0.000778
18	581.880772	10810.118220	581.881303	10810.119100	0.000531	0.000880
19	582.047752	10810.196144	582.048128	10810.197097	0.000376	0.000953
20	582.236996	10810.296332	582.237213	10810.297335	0.000217	0.001003
21	582.437372	10810.385388	582.437433	10810.386416	0.000061	0.001028

Lintasan Kapal LNG Kosong gangguan Angin 1.5 km/jam Sudut 40 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
22	582.648880	10810.474444	582.648793	10810.475464	0.000087	0.001020
23	582.904916	10810.574632	582.904692	10810.575633	0.000224	0.001001
24	583.172084	10810.663688	583.171735	10810.664657	0.000349	0.000969
25	583.461516	10810.763876	583.461049	10810.764796	0.000467	0.000920
26	583.784344	10810.875196	583.783769	10810.876052	0.000575	0.000856
27	584.107172	10810.986516	584.106507	10810.987304	0.000665	0.000788
28	584.452264	10811.086704	584.451527	10811.087417	0.000737	0.000713
29	584.808488	10811.198024	584.807690	10811.198668	0.000798	0.000644
30	585.164712	10811.298212	585.163872	10811.298803	0.000840	0.000591
31	585.543200	10811.398400	585.542325	10811.398940	0.000875	0.000540
32	585.910556	10811.509720	585.909652	10811.510210	0.000904	0.000490
33	586.322440	10811.643304	586.321516	10811.643750	0.000924	0.000446
34	586.734324	10811.776888	586.733387	10811.777313	0.000937	0.000425
35	587.123944	10811.910472	587.122998	10811.910873	0.000946	0.000401
36	587.591488	10812.110848	587.590536	10812.111238	0.000952	0.000390
37	587.958844	10812.322356	587.957888	10812.322738	0.000956	0.000382
38	588.381860	10812.567260	588.380905	10812.567640	0.000955	0.000380
39	588.793744	10812.801032	588.792795	10812.801424	0.000949	0.000392
40	589.161100	10813.012540	589.160159	10813.012953	0.000941	0.000413
MIN					0.000061	0.000000
MAX					0.001028	0.001028
Rata-rata					0.000804	0.000450

Lintasan Kapal LNG Kosong gangguan Angin 1.5 km/jam Sudut 50 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
0	581.001344	10809.060680	581.002372	10809.060680	0.001028	0.000000
1	581.001344	10809.105208	581.002372	10809.105208	0.001028	0.000000
2	581.001344	10809.149736	581.002372	10809.149735	0.001028	0.000001

Lintasan Kapal LNG Kosong gangguan Angin 1.5 km/jam Sudut 50 Derajat

waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
3	580.990212	10809.205396	580.991240	10809.205393	0.001028	0.000003
4	580.990212	10809.272188	580.991240	10809.272176	0.001028	0.000012
5	580.990212	10809.350112	580.991240	10809.350091	0.001028	0.000021
6	580.979080	10809.416904	580.980108	10809.416881	0.001028	0.000023
7	580.979080	10809.494828	580.980108	10809.494804	0.001028	0.000024
8	580.990212	10809.550488	580.991239	10809.550456	0.001027	0.000032
9	581.012476	10809.639544	581.013504	10809.639514	0.001028	0.000030
10	581.068136	10809.728600	581.069164	10809.728591	0.001028	0.000009
11	581.123796	10809.784260	581.124823	10809.784295	0.001027	0.000035
12	581.201720	10809.828788	581.202743	10809.828894	0.001023	0.000106
13	581.290776	10809.862184	581.291783	10809.862385	0.001007	0.000201
14	581.368700	10809.895580	581.369671	10809.895916	0.000971	0.000336
15	581.491152	10809.940108	581.492062	10809.940589	0.000910	0.000481
16	581.602472	10809.984636	581.603287	10809.985266	0.000815	0.000630
17	581.724924	10810.040296	581.725614	10810.041062	0.000690	0.000766
18	581.880772	10810.118220	581.881315	10810.119093	0.000543	0.000873
19	582.047752	10810.196144	582.048136	10810.197094	0.000384	0.000950
20	582.236996	10810.296332	582.237215	10810.297334	0.000219	0.001002
21	582.437372	10810.385388	582.437428	10810.386416	0.000056	0.001028
22	582.648880	10810.474444	582.648782	10810.475463	0.000098	0.001019
23	582.904916	10810.574632	582.904675	10810.575629	0.000241	0.000997
24	583.172084	10810.663688	583.171714	10810.664649	0.000370	0.000961
25	583.461516	10810.763876	583.461028	10810.764785	0.000488	0.000909
26	583.784344	10810.875196	583.783752	10810.876041	0.000592	0.000845
27	584.107172	10810.986516	584.106493	10810.987292	0.000679	0.000776
28	584.452264	10811.086704	584.451516	10811.087405	0.000748	0.000701
29	584.808488	10811.198024	584.807683	10811.198659	0.000805	0.000635
30	585.164712	10811.298212	585.163864	10811.298792	0.000848	0.000580

Lintasan Kapal LNG Kosong gangguan Angin 1.5 km/jam Sudut 50 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
31	585.543200	10811.398400	585.542319	10811.398929	0.000881	0.000529
32	585.910556	10811.509720	585.909647	10811.510201	0.000909	0.000481
33	586.322440	10811.643304	586.321512	10811.643742	0.000928	0.000438
34	586.734324	10811.776888	586.733383	10811.777305	0.000941	0.000417
35	587.123944	10811.910472	587.122995	10811.910865	0.000949	0.000393
36	587.591488	10812.110848	587.590534	10812.111233	0.000954	0.000385
37	587.958844	10812.322356	587.957888	10812.322739	0.000956	0.000383
38	588.381860	10812.567260	588.380908	10812.567647	0.000952	0.000387
39	588.793744	10812.801032	588.792800	10812.801438	0.000944	0.000406
40	589.161100	10813.012540	589.160168	10813.012975	0.000932	0.000435
MIN					0.000056	0.000000
MAX					0.001028	0.001028
Rata-rata					0.000809	0.000445

Lintasan Kapal LNG Kosong gangguan Angin 15 km/jam Sudut 30 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
0	581.001344	10809.060680	581.002372	10809.060680	0.001028	0.000000
1	581.001344	10809.105208	581.002372	10809.105209	0.001028	0.000001
2	581.001344	10809.149736	581.002372	10809.149737	0.001028	0.000001
3	580.990212	10809.205396	580.991240	10809.205395	0.001028	0.000001
4	580.990212	10809.272188	580.991240	10809.272177	0.001028	0.000011
5	580.990212	10809.350112	580.991240	10809.350090	0.001028	0.000022
6	580.979080	10809.416904	580.980108	10809.416877	0.001028	0.000027
7	580.979080	10809.494828	580.980107	10809.494797	0.001027	0.000031
8	580.990212	10809.550488	580.991239	10809.550450	0.001027	0.000038
9	581.012476	10809.639544	581.013503	10809.639507	0.001027	0.000037
10	581.068136	10809.728600	581.069164	10809.728588	0.001028	0.000012
11	581.123796	10809.784260	581.124823	10809.784297	0.001027	0.000037

Lintasan Kapal LNG Kosong gangguan Angin 15 km/jam Sudut 30 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
12	581.201720	10809.828788	581.202742	10809.828905	0.001022	0.000117
13	581.290776	10809.862184	581.291778	10809.862409	0.001002	0.000225
14	581.368700	10809.895580	581.369658	10809.895954	0.000958	0.000374
15	581.491152	10809.940108	581.492034	10809.940639	0.000882	0.000531
16	581.602472	10809.984636	581.603241	10809.985322	0.000769	0.000686
17	581.724924	10810.040296	581.725548	10810.041117	0.000624	0.000821
18	581.880772	10810.118220	581.881231	10810.119140	0.000459	0.000920
19	582.047752	10810.196144	582.048036	10810.197128	0.000284	0.000984
20	582.236996	10810.296332	582.237104	10810.297352	0.000108	0.001020
21	582.437372	10810.385388	582.437314	10810.386416	0.000058	0.001028
22	582.648880	10810.474444	582.648668	10810.475446	0.000212	0.001002
23	582.904916	10810.574632	582.904566	10810.575597	0.000350	0.000965
24	583.172084	10810.663688	583.171612	10810.664603	0.000472	0.000915
25	583.461516	10810.763876	583.460937	10810.764729	0.000579	0.000853
26	583.784344	10810.875196	583.783674	10810.875979	0.000670	0.000783
27	584.107172	10810.986516	584.106427	10810.987229	0.000745	0.000713
28	584.452264	10811.086704	584.451461	10811.087342	0.000803	0.000638
29	584.808488	10811.198024	584.807638	10811.198598	0.000850	0.000574
30	585.164712	10811.298212	585.163827	10811.298733	0.000885	0.000521
31	585.543200	10811.398400	585.542288	10811.398874	0.000912	0.000474
32	585.910556	10811.509720	585.909623	10811.510151	0.000933	0.000431
33	586.322440	10811.643304	586.321492	10811.643698	0.000948	0.000394
34	586.734324	10811.776888	586.733367	10811.777265	0.000957	0.000377
35	587.123944	10811.910472	587.122981	10811.910831	0.000963	0.000359
36	587.591488	10812.110848	587.590523	10812.111205	0.000965	0.000357
37	587.958844	10812.322356	587.957880	10812.322718	0.000964	0.000362
38	588.381860	10812.567260	588.380903	10812.567635	0.000957	0.000375
39	588.793744	10812.801032	588.792799	10812.801434	0.000945	0.000402

Lintasan Kapal LNG Kosong gangguan Angin 15 km/jam Sudut 30 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
40	589.161100	10813.012540	589.160171	10813.012979	0.000929	0.000439
MIN					0.000058	0.000000
MAX					0.001028	0.001028
Rata-rata					0.000818	0.000436

Lintasan Kapal LNG Kosong gangguan Angin 15 km/jam Sudut 40 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
0	581.001344	10809.060680	581.002372	10809.060680	0.001028	0.000000
1	581.001344	10809.105208	581.002372	10809.105209	0.001028	0.000001
2	581.001344	10809.149736	581.002372	10809.149737	0.001028	0.000001
3	580.990212	10809.205396	580.991240	10809.205395	0.001028	0.000001
4	580.990212	10809.272188	580.991240	10809.272178	0.001028	0.000010
5	580.990212	10809.350112	580.991240	10809.350092	0.001028	0.000020
6	580.979080	10809.416904	580.980108	10809.416880	0.001028	0.000024
7	580.979080	10809.494828	580.980108	10809.494801	0.001028	0.000027
8	580.990212	10809.550488	580.991239	10809.550454	0.001027	0.000034
9	581.012476	10809.639544	581.013503	10809.639510	0.001027	0.000034
10	581.068136	10809.728600	581.069164	10809.728587	0.001028	0.000013
11	581.123796	10809.784260	581.124824	10809.784289	0.001028	0.000029
12	581.201720	10809.828788	581.202744	10809.828887	0.001024	0.000099
13	581.290776	10809.862184	581.291786	10809.862378	0.001010	0.000194
14	581.368700	10809.895580	581.369676	10809.895909	0.000976	0.000329
15	581.491152	10809.940108	581.492067	10809.940583	0.000915	0.000475
16	581.602472	10809.984636	581.603295	10809.985261	0.000823	0.000625
17	581.724924	10810.040296	581.725623	10810.041058	0.000699	0.000762
18	581.880772	10810.118220	581.881323	10810.119090	0.000551	0.000870
19	582.047752	10810.196144	582.048141	10810.197093	0.000389	0.000949
20	582.236996	10810.296332	582.237215	10810.297334	0.000219	0.001002

Lintasan Kapal LNG Kosong gangguan Angin 15 km/jam Sudut 40 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
21	582.437372	10810.385388	582.437425	10810.386417	0.000053	0.001029
22	582.648880	10810.474444	582.648774	10810.475463	0.000106	0.001019
23	582.904916	10810.574632	582.904663	10810.575628	0.000253	0.000996
24	583.172084	10810.663688	583.171699	10810.664646	0.000385	0.000958
25	583.461516	10810.763876	583.461013	10810.764780	0.000503	0.000904
26	583.784344	10810.875196	583.783740	10810.876036	0.000604	0.000840
27	584.107172	10810.986516	584.106484	10810.987288	0.000688	0.000772
28	584.452264	10811.086704	584.451508	10811.087401	0.000756	0.000697
29	584.808488	10811.198024	584.807677	10811.198655	0.000811	0.000631
30	585.164712	10811.298212	585.163859	10811.298787	0.000853	0.000575
31	585.543200	10811.398400	585.542314	10811.398925	0.000886	0.000525
32	585.910556	10811.509720	585.909644	10811.510197	0.000912	0.000477
33	586.322440	10811.643304	586.321509	10811.643739	0.000931	0.000435
34	586.734324	10811.776888	586.733381	10811.777302	0.000943	0.000414
35	587.123944	10811.910472	587.122993	10811.910862	0.000951	0.000390
36	587.591488	10812.110848	587.590532	10812.111231	0.000956	0.000383
37	587.958844	10812.322356	587.957888	10812.322739	0.000956	0.000383
38	588.381860	10812.567260	588.380910	10812.567650	0.000950	0.000390
39	588.793744	10812.801032	588.792804	10812.801443	0.000940	0.000411
40	589.161100	10813.012540	589.160175	10813.012982	0.000925	0.000442
MIN					0.000053	0.000000
MAX					0.001028	0.001029
Rata-rata					0.000812	0.000443

Lintasan Kapal LNG Kosong gangguan Angin 15 km/jam Sudut 50 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
0	581.001344	10809.060680	581.002372	10809.060680	0.001028	0.000000
1	581.001344	10809.105208	581.002372	10809.105210	0.001028	0.000002

Lintasan Kapal LNG Kosong gangguan Angin 15 km/jam Sudut 50 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
2	581.001344	10809.149736	581.002372	10809.149739	0.001028	0.000003
3	580.990212	10809.205396	580.991240	10809.205398	0.001028	0.000002
4	580.990212	10809.272188	580.991240	10809.272180	0.001028	0.000008
5	580.990212	10809.350112	580.991240	10809.350093	0.001028	0.000019
6	580.979080	10809.416904	580.980108	10809.416877	0.001028	0.000027
7	580.979080	10809.494828	580.980107	10809.494797	0.001027	0.000031
8	580.990212	10809.550488	580.991239	10809.550450	0.001027	0.000038
9	581.012476	10809.639544	581.013503	10809.639504	0.001027	0.000040
10	581.068136	10809.728600	581.069164	10809.728580	0.001028	0.000020
11	581.123796	10809.784260	581.124824	10809.784280	0.001028	0.000020
12	581.201720	10809.828788	581.202744	10809.828879	0.001024	0.000091
13	581.290776	10809.862184	581.291786	10809.862370	0.001010	0.000186
14	581.368700	10809.895580	581.369677	10809.895900	0.000977	0.000320
15	581.491152	10809.940108	581.492069	10809.940575	0.000917	0.000467
16	581.602472	10809.984636	581.603297	10809.985254	0.000825	0.000618
17	581.724924	10810.040296	581.725626	10810.041051	0.000702	0.000755
18	581.880772	10810.118220	581.881326	10810.119086	0.000554	0.000866
19	582.047752	10810.196144	582.048142	10810.197091	0.000390	0.000947
20	582.236996	10810.296332	582.237216	10810.297334	0.000220	0.001002
21	582.437372	10810.385388	582.437424	10810.386417	0.000052	0.001029
22	582.648880	10810.474444	582.648772	10810.475462	0.000108	0.001018
23	582.904916	10810.574632	582.904660	10810.575626	0.000256	0.000994
24	583.172084	10810.663688	583.171695	10810.664642	0.000389	0.000954
25	583.461516	10810.763876	583.461010	10810.764775	0.000506	0.000899
26	583.784344	10810.875196	583.783737	10810.876030	0.000607	0.000834
27	584.107172	10810.986516	584.106482	10810.987282	0.000690	0.000766
28	584.452264	10811.086704	584.451506	10811.087395	0.000758	0.000691
29	584.808488	10811.198024	584.807676	10811.198650	0.000812	0.000626

Lintasan Kapal LNG Kosong gangguan Angin 15 km/jam Sudut 50 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
30	585.164712	10811.298212	585.163858	10811.298782	0.000854	0.000570
31	585.543200	10811.398400	585.542313	10811.398919	0.000887	0.000519
32	585.910556	10811.509720	585.909643	10811.510193	0.000913	0.000473
33	586.322440	10811.643304	586.321509	10811.643735	0.000931	0.000431
34	586.734324	10811.776888	586.733380	10811.777297	0.000944	0.000409
35	587.123944	10811.910472	587.122992	10811.910858	0.000952	0.000386
36	587.591488	10812.110848	587.590532	10812.111228	0.000956	0.000380
37	587.958844	10812.322356	587.957888	10812.322739	0.000956	0.000383
38	588.381860	10812.567260	588.380910	10812.567653	0.000950	0.000393
39	588.793744	10812.801032	588.792805	10812.801449	0.000939	0.000417
40	589.161100	10813.012540	589.160177	10813.012993	0.000923	0.000453
MIN					0.000052	0.000000
MAX					0.001028	0.001029
Rata-rata					0.000813	0.000441

4. Simulasi pada kapal LNG beban penuh dengan adanya gangguan angin

Lintasan Kapal LNG Beban Penuh gangguan Angin 1.5 km/jam Sudut 30 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
0	581.001344	10809.060680	581.002372	10809.060680	0.001028	0.000000
1	581.001344	10809.105208	581.002372	10809.105208	0.001028	0.000000
2	581.001344	10809.149736	581.002372	10809.149735	0.001028	0.000001
3	580.990212	10809.205396	580.991240	10809.205394	0.001028	0.000002
4	580.990212	10809.272188	580.991240	10809.272177	0.001028	0.000011
5	580.990212	10809.350112	580.991240	10809.350091	0.001028	0.000021
6	580.979080	10809.416904	580.980108	10809.416881	0.001028	0.000023

Lintasan Kapal LNG Beban Penuh gangguan Angin 1.5 km/jam Sudut 30 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
7	580.979080	10809.494828	580.980108	10809.494803	0.001028	0.000025
8	580.990212	10809.550488	580.991239	10809.550456	0.001027	0.000032
9	581.012476	10809.639544	581.013504	10809.639513	0.001028	0.000031
10	581.068136	10809.728600	581.069164	10809.728590	0.001028	0.000010
11	581.123796	10809.784260	581.124823	10809.784294	0.001027	0.000034
12	581.201720	10809.828788	581.202743	10809.828892	0.001023	0.000104
13	581.290776	10809.862184	581.291784	10809.862383	0.001008	0.000199
14	581.368700	10809.895580	581.369672	10809.895915	0.000972	0.000335
15	581.491152	10809.940108	581.492062	10809.940587	0.000910	0.000479
16	581.602472	10809.984636	581.603288	10809.985265	0.000816	0.000629
17	581.724924	10810.040296	581.725615	10810.041061	0.000691	0.000765
18	581.880772	10810.118220	581.881316	10810.119092	0.000544	0.000872
19	582.047752	10810.196144	582.048136	10810.197094	0.000384	0.000950
20	582.236996	10810.296332	582.237215	10810.297334	0.000219	0.001002
21	582.437372	10810.385388	582.437428	10810.386416	0.000056	0.001028
22	582.648880	10810.474444	582.648781	10810.475463	0.000099	0.001019
23	582.904916	10810.574632	582.904674	10810.575629	0.000242	0.000997
24	583.172084	10810.663688	583.171712	10810.664648	0.000372	0.000960
25	583.461516	10810.763876	583.461026	10810.764784	0.000490	0.000908
26	583.784344	10810.875196	583.783751	10810.876039	0.000593	0.000843
27	584.107172	10810.986516	584.106492	10810.987291	0.000680	0.000775
28	584.452264	10811.086704	584.451515	10811.087404	0.000749	0.000700
29	584.808488	10811.198024	584.807682	10811.198658	0.000806	0.000634
30	585.164712	10811.298212	585.163864	10811.298791	0.000848	0.000579
31	585.543200	10811.398400	585.542318	10811.398928	0.000882	0.000528
32	585.910556	10811.509720	585.909647	10811.510200	0.000909	0.000480
33	586.322440	10811.643304	586.321512	10811.643741	0.000928	0.000437
34	586.734324	10811.776888	586.733383	10811.777304	0.000941	0.000416

Lintasan Kapal LNG Beban Penuh gangguan Angin 1.5 km/jam Sudut 30 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
35	587.123944	10811.910472	587.122995	10811.910865	0.000949	0.000393
36	587.591488	10812.110848	587.590534	10812.111233	0.000954	0.000385
37	587.958844	10812.322356	587.957888	10812.322739	0.000956	0.000383
38	588.381860	10812.567260	588.380908	10812.567648	0.000952	0.000388
39	588.793744	10812.801032	588.792801	10812.801439	0.000943	0.000407
40	589.161100	10813.012540	589.160169	10813.012976	0.000931	0.000436
MIN					0.000056	0.000000
MAX					0.001028	0.001028
Rata-rata					0.000809	0.000444

Lintasan Kapal LNG Beban Penuh gangguan Angin 1.5 km/jam Sudut 40 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
0	581.001344	10809.060680	581.002372	10809.060680	0.001028	0.000000
1	581.001344	10809.105208	581.002372	10809.105208	0.001028	0.000000
2	581.001344	10809.149736	581.002372	10809.149735	0.001028	0.000001
3	580.990212	10809.205396	580.991240	10809.205394	0.001028	0.000002
4	580.990212	10809.272188	580.991240	10809.272176	0.001028	0.000012
5	580.990212	10809.350112	580.991240	10809.350091	0.001028	0.000021
6	580.979080	10809.416904	580.980108	10809.416881	0.001028	0.000023
7	580.979080	10809.494828	580.980108	10809.494803	0.001028	0.000025
8	580.990212	10809.550488	580.991239	10809.550456	0.001027	0.000032
9	581.012476	10809.639544	581.013504	10809.639514	0.001028	0.000030
10	581.068136	10809.728600	581.069164	10809.728591	0.001028	0.000009
11	581.123796	10809.784260	581.124823	10809.784295	0.001027	0.000035
12	581.201720	10809.828788	581.202743	10809.828893	0.001023	0.000105
13	581.290776	10809.862184	581.291784	10809.862384	0.001008	0.000200
14	581.368700	10809.895580	581.369672	10809.895916	0.000972	0.000336

Lintasan Kapal LNG Beban Penuh gangguan Angin 1.5 km/jam Sudut 40 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
15	581.491152	10809.940108	581.492062	10809.940588	0.000910	0.000480
16	581.602472	10809.984636	581.603288	10809.985266	0.000816	0.000630
17	581.724924	10810.040296	581.725615	10810.041061	0.000691	0.000765
18	581.880772	10810.118220	581.881316	10810.119093	0.000544	0.000873
19	582.047752	10810.196144	582.048136	10810.197094	0.000384	0.000950
20	582.236996	10810.296332	582.237215	10810.297334	0.000219	0.001002
21	582.437372	10810.385388	582.437428	10810.386416	0.000056	0.001028
22	582.648880	10810.474444	582.648781	10810.475463	0.000099	0.001019
23	582.904916	10810.574632	582.904674	10810.575629	0.000242	0.000997
24	583.172084	10810.663688	583.171713	10810.664649	0.000371	0.000961
25	583.461516	10810.763876	583.461027	10810.764784	0.000489	0.000908
26	583.784344	10810.875196	583.783751	10810.876040	0.000593	0.000844
27	584.107172	10810.986516	584.106493	10810.987292	0.000679	0.000776
28	584.452264	10811.086704	584.451516	10811.087405	0.000748	0.000701
29	584.808488	10811.198024	584.807682	10811.198658	0.000806	0.000634
30	585.164712	10811.298212	585.163864	10811.298791	0.000848	0.000579
31	585.543200	10811.398400	585.542318	10811.398929	0.000882	0.000529
32	585.910556	10811.509720	585.909647	10811.510200	0.000909	0.000480
33	586.322440	10811.643304	586.321512	10811.643742	0.000928	0.000438
34	586.734324	10811.776888	586.733383	10811.777304	0.000941	0.000416
35	587.123944	10811.910472	587.122995	10811.910865	0.000949	0.000393
36	587.591488	10812.110848	587.590534	10812.111233	0.000954	0.000385
37	587.958844	10812.322356	587.957888	10812.322739	0.000956	0.000383
38	588.381860	10812.567260	588.380908	10812.567648	0.000952	0.000388
39	588.793744	10812.801032	588.792800	10812.801438	0.000944	0.000406
40	589.161100	10813.012540	589.160169	10813.012975	0.000931	0.000435
MIN					0.000056	0.000000
MAX					0.001028	0.001028

Lintasan Kapal LNG Beban Penuh gangguan Angin 1.5 km/jam Sudut 40 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
Rata-rata					0.000809	0.000445

Lintasan Kapal LNG Beban Penuh gangguan Angin 1.5 km/jam Sudut 50 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
0	581.001344	10809.060680	581.002372	10809.060680	0.001028	0.000000
1	581.001344	10809.105208	581.002372	10809.105208	0.001028	0.000000
2	581.001344	10809.149736	581.002372	10809.149734	0.001028	0.000002
3	580.990212	10809.205396	580.991240	10809.205393	0.001028	0.000003
4	580.990212	10809.272188	580.991240	10809.272175	0.001028	0.000013
5	580.990212	10809.350112	580.991240	10809.350089	0.001028	0.000023
6	580.979080	10809.416904	580.980108	10809.416878	0.001028	0.000026
7	580.979080	10809.494828	580.980108	10809.494800	0.001028	0.000028
8	580.990212	10809.550488	580.991239	10809.550452	0.001027	0.000036
9	581.012476	10809.639544	581.013504	10809.639512	0.001028	0.000032
10	581.068136	10809.728600	581.069164	10809.728593	0.001028	0.000007
11	581.123796	10809.784260	581.124823	10809.784303	0.001027	0.000043
12	581.201720	10809.828788	581.202741	10809.828912	0.001021	0.000124
13	581.290776	10809.862184	581.291777	10809.862416	0.001001	0.000232
14	581.368700	10809.895580	581.369655	10809.895962	0.000955	0.000382
15	581.491152	10809.940108	581.492030	10809.940645	0.000878	0.000537
16	581.602472	10809.984636	581.603236	10809.985327	0.000764	0.000691
17	581.724924	10810.040296	581.725543	10810.041121	0.000619	0.000825
18	581.880772	10810.118220	581.881225	10810.119143	0.000453	0.000923
19	582.047752	10810.196144	582.048032	10810.197129	0.000280	0.000985
20	582.236996	10810.296332	582.237103	10810.297352	0.000107	0.001020
21	582.437372	10810.385388	582.437315	10810.386416	0.000057	0.001028
22	582.648880	10810.474444	582.648671	10810.475447	0.000209	0.001003

Lintasan Kapal LNG Beban Penuh gangguan Angin 1.5 km/jam Sudut 50 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
23	582.904916	10810.574632	582.904571	10810.575598	0.000345	0.000966
24	583.172084	10810.663688	583.171619	10810.664607	0.000465	0.000919
25	583.461516	10810.763876	583.460944	10810.764734	0.000572	0.000858
26	583.784344	10810.875196	583.783679	10810.875984	0.000665	0.000788
27	584.107172	10810.986516	584.106432	10810.987233	0.000740	0.000717
28	584.452264	10811.086704	584.451464	10811.087346	0.000800	0.000642
29	584.808488	10811.198024	584.807640	10811.198601	0.000848	0.000577
30	585.164712	10811.298212	585.163829	10811.298737	0.000883	0.000525
31	585.543200	10811.398400	585.542290	10811.398879	0.000910	0.000479
32	585.910556	10811.509720	585.909624	10811.510155	0.000932	0.000435
33	586.322440	10811.643304	586.321493	10811.643701	0.000947	0.000397
34	586.734324	10811.776888	586.733368	10811.777268	0.000956	0.000380
35	587.123944	10811.910472	587.122983	10811.910834	0.000961	0.000362
36	587.591488	10812.110848	587.590524	10812.111207	0.000964	0.000359
37	587.958844	10812.322356	587.957880	10812.322718	0.000964	0.000362
38	588.381860	10812.567260	588.380902	10812.567633	0.000958	0.000373
39	588.793744	10812.801032	588.792797	10812.801429	0.000947	0.000397
40	589.161100	10813.012540	589.160167	10813.012972	0.000933	0.000432
MIN					0.000057	0.000000
MAX					0.001028	0.001028
Rata-rata					0.000816	0.000437

Lintasan Kapal LNG Beban Penuh gangguan Angin 15 km/jam Sudut 30 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
0	581.001344	10809.060680	581.002372	10809.060680	0.001028	0.000000
1	581.001344	10809.105208	581.002372	10809.105209	0.001028	0.000001
2	581.001344	10809.149736	581.002372	10809.149737	0.001028	0.000001

Lintasan Kapal LNG Beban Penuh gangguan Angin 15 km/jam Sudut 30 Derajat

waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
3	580.990212	10809.205396	580.991240	10809.205395	0.001028	0.000001
4	580.990212	10809.272188	580.991240	10809.272177	0.001028	0.000011
5	580.990212	10809.350112	580.991240	10809.350090	0.001028	0.000022
6	580.979080	10809.416904	580.980108	10809.416877	0.001028	0.000027
7	580.979080	10809.494828	580.980107	10809.494797	0.001027	0.000031
8	580.990212	10809.550488	580.991239	10809.550450	0.001027	0.000038
9	581.012476	10809.639544	581.013503	10809.639507	0.001027	0.000037
10	581.068136	10809.728600	581.069164	10809.728588	0.001028	0.000012
11	581.123796	10809.784260	581.124823	10809.784297	0.001027	0.000037
12	581.201720	10809.828788	581.202742	10809.828905	0.001022	0.000117
13	581.290776	10809.862184	581.291778	10809.862409	0.001002	0.000225
14	581.368700	10809.895580	581.369658	10809.895954	0.000958	0.000374
15	581.491152	10809.940108	581.492034	10809.940639	0.000882	0.000531
16	581.602472	10809.984636	581.603241	10809.985322	0.000769	0.000686
17	581.724924	10810.040296	581.725548	10810.041117	0.000624	0.000821
18	581.880772	10810.118220	581.881231	10810.119140	0.000459	0.000920
19	582.047752	10810.196144	582.048036	10810.197128	0.000284	0.000984
20	582.236996	10810.296332	582.237104	10810.297352	0.000108	0.001020
21	582.437372	10810.385388	582.437314	10810.386416	0.000058	0.001028
22	582.648880	10810.474444	582.648668	10810.475446	0.000212	0.001002
23	582.904916	10810.574632	582.904566	10810.575597	0.000350	0.000965
24	583.172084	10810.663688	583.171612	10810.664603	0.000472	0.000915
25	583.461516	10810.763876	583.460937	10810.764729	0.000579	0.000853
26	583.784344	10810.875196	583.783674	10810.875979	0.000670	0.000783
27	584.107172	10810.986516	584.106427	10810.987229	0.000745	0.000713
28	584.452264	10811.086704	584.451461	10811.087342	0.000803	0.000638
29	584.808488	10811.198024	584.807638	10811.198598	0.000850	0.000574
30	585.164712	10811.298212	585.163827	10811.298733	0.000885	0.000521

Lintasan Kapal LNG Beban Penuh gangguan Angin 15 km/jam Sudut 30 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
31	585.543200	10811.398400	585.542288	10811.398874	0.000912	0.000474
32	585.910556	10811.509720	585.909623	10811.510151	0.000933	0.000431
33	586.322440	10811.643304	586.321492	10811.643698	0.000948	0.000394
34	586.734324	10811.776888	586.733367	10811.777265	0.000957	0.000377
35	587.123944	10811.910472	587.122981	10811.910831	0.000963	0.000359
36	587.591488	10812.110848	587.590523	10812.111205	0.000965	0.000357
37	587.958844	10812.322356	587.957880	10812.322718	0.000964	0.000362
38	588.381860	10812.567260	588.380903	10812.567635	0.000957	0.000375
39	588.793744	10812.801032	588.792799	10812.801434	0.000945	0.000402
40	589.161100	10813.012540	589.160171	10813.012979	0.000929	0.000439
MIN					0.000058	0.000000
MAX					0.001028	0.001028
Rata-rata					0.000818	0.000436

Lintasan Kapal LNG Beban Penuh gangguan Angin 15 km/jam Sudut 40 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
0	581.001344	10809.060680	581.002372	10809.060680	0.001028	0.000000
1	581.001344	10809.105208	581.002372	10809.105209	0.001028	0.000001
2	581.001344	10809.149736	581.002372	10809.149738	0.001028	0.000002
3	580.990212	10809.205396	580.991240	10809.205397	0.001028	0.000001
4	580.990212	10809.272188	580.991240	10809.272178	0.001028	0.000010
5	580.990212	10809.350112	580.991240	10809.350091	0.001028	0.000021
6	580.979080	10809.416904	580.980108	10809.416875	0.001028	0.000029
7	580.979080	10809.494828	580.980107	10809.494795	0.001027	0.000033
8	580.990212	10809.550488	580.991239	10809.550447	0.001027	0.000041
9	581.012476	10809.639544	581.013503	10809.639503	0.001027	0.000041
10	581.068136	10809.728600	581.069164	10809.728583	0.001028	0.000017
11	581.123796	10809.784260	581.124824	10809.784291	0.001028	0.000031

Lintasan Kapal LNG Beban Penuh gangguan Angin 15 km/jam Sudut 40 Derajat

waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
12	581.201720	10809.828788	581.202742	10809.828899	0.001022	0.000111
13	581.290776	10809.862184	581.291779	10809.862403	0.001003	0.000219
14	581.368700	10809.895580	581.369660	10809.895947	0.000960	0.000367
15	581.491152	10809.940108	581.492037	10809.940633	0.000885	0.000525
16	581.602472	10809.984636	581.603246	10809.985317	0.000774	0.000681
17	581.724924	10810.040296	581.725554	10810.041113	0.000630	0.000817
18	581.880772	10810.118220	581.881236	10810.119138	0.000464	0.000918
19	582.047752	10810.196144	582.048039	10810.197127	0.000287	0.000983
20	582.236996	10810.296332	582.237106	10810.297352	0.000110	0.001020
21	582.437372	10810.385388	582.437313	10810.386416	0.000059	0.001028
22	582.648880	10810.474444	582.648665	10810.475445	0.000215	0.001001
23	582.904916	10810.574632	582.904561	10810.575595	0.000355	0.000963
24	583.172084	10810.663688	583.171606	10810.664600	0.000478	0.000912
25	583.461516	10810.763876	583.460931	10810.764726	0.000585	0.000850
26	583.784344	10810.875196	583.783669	10810.875976	0.000675	0.000780
27	584.107172	10810.986516	584.106424	10810.987225	0.000748	0.000709
28	584.452264	10811.086704	584.451458	10811.087338	0.000806	0.000634
29	584.808488	10811.198024	584.807636	10811.198595	0.000852	0.000571
30	585.164712	10811.298212	585.163825	10811.298730	0.000887	0.000518
31	585.543200	10811.398400	585.542286	10811.398871	0.000914	0.000471
32	585.910556	10811.509720	585.909622	10811.510148	0.000934	0.000428
33	586.322440	10811.643304	586.321491	10811.643695	0.000949	0.000391
34	586.734324	10811.776888	586.733366	10811.777262	0.000958	0.000374
35	587.123944	10811.910472	587.122980	10811.910828	0.000964	0.000356
36	587.591488	10812.110848	587.590522	10812.111203	0.000966	0.000355
37	587.958844	10812.322356	587.957880	10812.322718	0.000964	0.000362
38	588.381860	10812.567260	588.380904	10812.567637	0.000956	0.000377
39	588.793744	10812.801032	588.792800	10812.801438	0.000944	0.000406

Lintasan Kapal LNG Beban Penuh gangguan Angin 15 km/jam Sudut 40 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
40	589.161100	10813.012540	589.160174	10813.012986	0.000926	0.000446
MIN					0.000059	0.000000
MAX					0.001028	0.001028
Rata-rata					0.000820	0.000434

Lintasan Kapal LNG Beban Penuh gangguan Angin 15 km/jam Sudut 50 Derajat						
waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
0	581.001344	10809.060680	581.002372	10809.060680	0.001028	0.000000
1	581.001344	10809.105208	581.002372	10809.105210	0.001028	0.000002
2	581.001344	10809.149736	581.002372	10809.149739	0.001028	0.000003
3	580.990212	10809.205396	580.991240	10809.205398	0.001028	0.000002
4	580.990212	10809.272188	580.991240	10809.272179	0.001028	0.000009
5	580.990212	10809.350112	580.991240	10809.350091	0.001028	0.000021
6	580.979080	10809.416904	580.980108	10809.416874	0.001028	0.000030
7	580.979080	10809.494828	580.980107	10809.494793	0.001027	0.000035
8	580.990212	10809.550488	580.991239	10809.550446	0.001027	0.000042
9	581.012476	10809.639544	581.013503	10809.639501	0.001027	0.000043
10	581.068136	10809.728600	581.069164	10809.728581	0.001028	0.000019
11	581.123796	10809.784260	581.124824	10809.784287	0.001028	0.000027
12	581.201720	10809.828788	581.202743	10809.828896	0.001023	0.000108
13	581.290776	10809.862184	581.291780	10809.862400	0.001004	0.000216
14	581.368700	10809.895580	581.369662	10809.895944	0.000962	0.000364
15	581.491152	10809.940108	581.492039	10809.940630	0.000887	0.000522
16	581.602472	10809.984636	581.603248	10809.985314	0.000776	0.000678
17	581.724924	10810.040296	581.725557	10810.041110	0.000633	0.000814
18	581.880772	10810.118220	581.881238	10810.119136	0.000466	0.000916
19	582.047752	10810.196144	582.048041	10810.197127	0.000289	0.000983
20	582.236996	10810.296332	582.237107	10810.297352	0.000111	0.001020

Lintasan Kapal LNG Beban Penuh gangguan Angin 15 km/jam Sudut 50 Derajat

waktu	Xd	Yd	Xa	Ya	Error X	Error Y
21	582.437372	10810.385388	582.437313	10810.386416	0.000059	0.001028
22	582.648880	10810.474444	582.648664	10810.475445	0.000216	0.001001
23	582.904916	10810.574632	582.904559	10810.575594	0.000357	0.000962
24	583.172084	10810.663688	583.171603	10810.664599	0.000481	0.000911
25	583.461516	10810.763876	583.460928	10810.764723	0.000588	0.000847
26	583.784344	10810.875196	583.783667	10810.875973	0.000677	0.000777
27	584.107172	10810.986516	584.106422	10810.987223	0.000750	0.000707
28	584.452264	10811.086704	584.451456	10811.087336	0.000808	0.000632
29	584.808488	10811.198024	584.807635	10811.198593	0.000853	0.000569
30	585.164712	10811.298212	585.163824	10811.298728	0.000888	0.000516
31	585.543200	10811.398400	585.542285	10811.398869	0.000915	0.000469
32	585.910556	10811.509720	585.909621	10811.510147	0.000935	0.000427
33	586.322440	10811.643304	586.321490	10811.643694	0.000950	0.000390
34	586.734324	10811.776888	586.733365	10811.777261	0.000959	0.000373
35	587.123944	10811.910472	587.122980	10811.910827	0.000964	0.000355
36	587.591488	10812.110848	587.590522	10812.111202	0.000966	0.000354
37	587.958844	10812.322356	587.957880	10812.322718	0.000964	0.000362
38	588.381860	10812.567260	588.380904	10812.567638	0.000956	0.000378
39	588.793744	10812.801032	588.792801	10812.801440	0.000943	0.000408
40	589.161100	10813.012540	589.160176	10813.012990	0.000924	0.000450
MIN					0.000059	0.000000
MAX					0.001028	0.001028
Rata-rata					0.000820	0.000433

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Farida Ambarwati yang akrab disapa ambar. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara, terlahir di kota Sidoarjo pada tanggal 9 September 1995. Penulis menempuh pendidikan di MI Al Amin Keboharan lulus tahun 2007, SMPN 3 Krian lulus tahun 2010, dan SMAN 1 Taman, Sidoarjo lulus tahun 2013. Pendidikan sarjana ditempuh di Jurusan Teknik Fisika ITS melalui jalur SNMPTN 2013 dan mendapat bantuan finansial dengan Program Bidik Misi. Selama aktif menjadi mahasiswa, penulis bergabung dalam organisasi kemahasiswaan HMTF selama periode 2014-2015 sebagai Staff & 2015-2016 sebagai Wakil Kepala Departemen dalam Departemen Sosial Masyarakat. Selain aktif dalam berorganisasi, penulis juga aktif dalam kegiatan akademik sebagai asisten Laboratorium Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol selama periode 2015-2016 & 2016-2017. Pengalaman *internship program* selama 1 bulan di PT. YTL Jawa Timur, Paiton. Bidang minat penulis dalam mengerjakan tugas akhir adalah instrumentasi. Penulis dapat dihubungi di email faridaambar9@gmail.com.